



Г. У. З. и З.  
ОТДѢЛЪ ЗЕМЕЛЬНЫХЪ УЛУЧШЕНІЙ.

626.1

Ч-60

В. В. Чиковъ.

Инженеръ Путей Сообщенія.

# ЗАИЛЕНІЕ ИРРИГАЦІОННЫХЪ КАНАЛОВЪ.

Выпускъ I.

ТЕОРІЯ ЗАИЛЕНІЯ КЕННЕДИ.

Съ 7-ю чертежами.



ПЕТРОГРАДЪ.

Типографія В. О. Киришаума, Двори. площ., д. М-ва Финансовъ.

1915.

19561

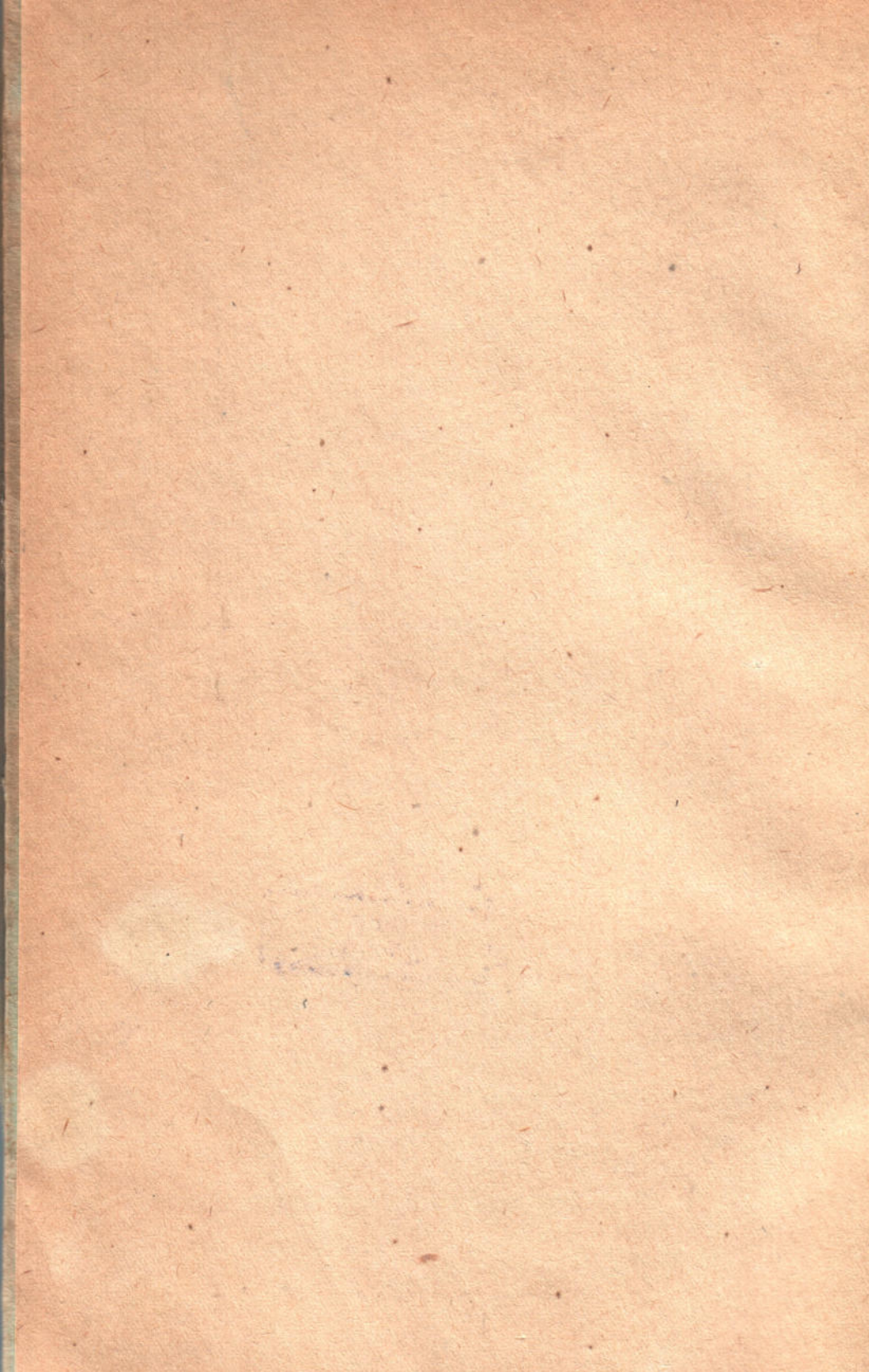


1959













Г. У. З. и З.  
ОТДѢЛЪ ЗЕМЕЛЬНЫХЪ УЛУЧШЕНІЙ.

у

626.  
ч-6

В. В. Чиковъ.

Инженеръ Путей Сообщенія.

# ЗАИЛЕНІЕ ИРРИГАЦІОННЫХЪ КАНАЛОВЪ.

Выпускъ I.

ТЕОРІЯ ЗАИЛЕНІЯ КЕННЕДИ.

Съ 7-ю чертежами.

проверено  
1966 г.

ПО ПЕТРОГРАДЪ.

Типографія В. О. Киришаума, Дворц. площ., д. М-ва Финансовъ.  
1915.

Библиотека  
Института  
-1959-

и









The Imperial Ministry of Landorganization.  
THE LANDIMPROVEMENT DEPARTMENT.

---

V. V. Chikoff,

.....

Russian Imperial Service, Engineer of Ways and Communications

# SILT IN IRRIGATION CANALS.

---

Vol I.

---

Kennedy's Silt Theory.

With 7 figures.

*epa*

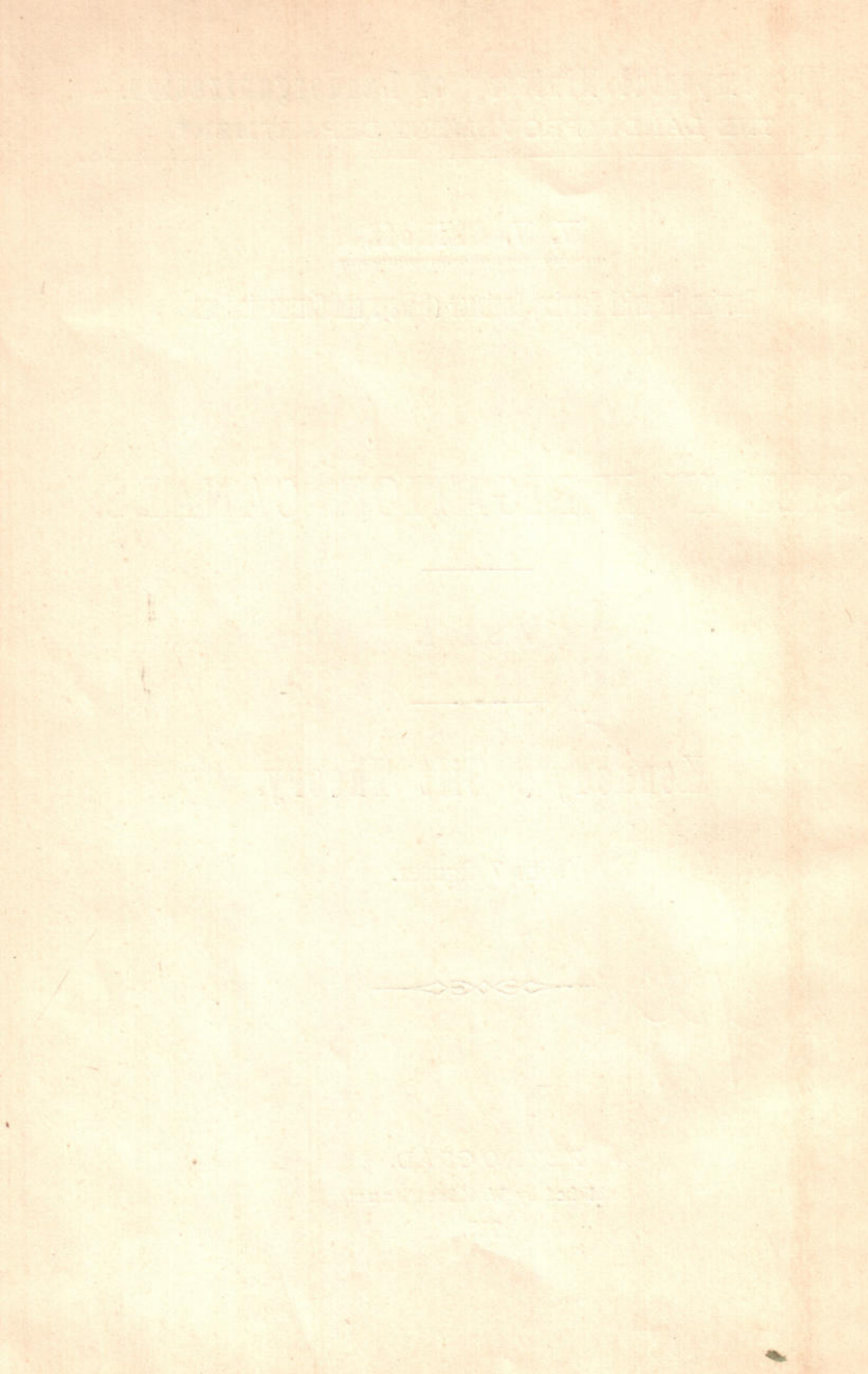


PETROGRAD.

Published by W. Kirshbaum.

1915.








Настоящій трудъ является отчасти результатомъ моей кратковременной командировки въ 1913 году отъ Отдѣла Земельныхъ Улучшеній въ Индію для изученія ирригаціонныхъ сооружений.

Я пользуюсь этимъ случаемъ, чтобы исполнить свой пріятный долгъ и выразить свою глубокую благодарность англійскимъ инженерамъ Пенджаба и Соединенныхъ провинцій, содѣйствіемъ и широкимъ гостепріимствомъ которыхъ я пользовался, и Императорскому Россійскому Генеральному Консулу въ Индіи К. Д. Набокову, личному участию котораго за свое трехмѣсячное пребываніе въ Индіи я такъ много обязанъ.

Инженеръ *В. В. Чиковъ.*

Петроградъ  
Январь 1915 года.







The present work is partly the result of my short journey to India, undertaken in 1913 at the request of the Landimprovement Department of the Imperial Ministry of Landorganization, for the purpose of studying Irrigation Works.

I avail myself of this opportunity to discharge the agreeable duty of expressing my heartfelt thanks to the English Engineers of the Punjab and the United Provinces, the cooperation and hearty hospitality of whom I enjoyed; and likewise to K. D. Nabokoff, Imperial Russian Consul General in India, to whom I am deeply indebted for his ready sympathy during my three months' sojourn in India.

Engineer *V. Chikoff.*

Petrograd,  
January 1915.







## Оглавление.

### Выпускъ I. Теорія заиленія Кеннеди.

	Стр.
Предисловіе. . . . .	3
Введеніе . . . . .	11
Изложеніе теоріи заиленія Кеннеди. . . . .	13
1. Опытныя данныя, лежащія въ основаніи теоріи . . . . .	13
2. Видъ формулы и кривой Кеннеди . . . . .	16
3. Насыщенность потока наносами. . . . .	18
4. Классы наносовъ, соотвѣтствующіе критической скорости . . . . .	20
5. Возраженія инженера Т. Higham'a противъ теоріи Кеннеди. . . . .	21
6. Пользованіе теоріей Кеннеди и практическіе коэффициенты. . . . .	24

## ВЫВОДЫ.

Приложеніе теоріи Кеннеди къ проектированію каналовъ. . . . .	26
1. Критическій уклонъ . . . . .	27
2. Критическая ширина по дну русла канала. . . . .	31
3. Коэффициентъ шероховатости . . . . .	33
4. Процессъ заиленія каналовъ. . . . .	34
5. Уравновѣшенное русла канала . . . . .	35

### Общее заключеніе.

1. Критическая скорость . . . . .	37
2. Критическая скорость, какъ функція глубины . . . . .	38
3. Зависимость критической скорости отъ количества и крупности наносовъ . . . . .	40
4. Уравненіе заиленія . . . . .	49
5. Опыты и наблюденія . . . . .	49

## Приложенія.

	Стр.
1. Таблица значеній критической скорости по у—ію $V_0 = \alpha \cdot 0,84 d^{0,64}$ для коэффициента $\alpha = 0,80; 0,90; 1,00; 1,10; 1,20$ и $1,30$ . . . . .	53
2. Таблица Кеннеди критических уклоновъ и скоростей для различныхъ расходовъ и глубинъ при коэффициентѣ шероховатости $n = 0,02375$ . . . . .	53
3. Таблица Garrett'a критическихъ уклоновъ для различныхъ расходовъ и глубинъ при коэффициентѣ шероховатости $n = 0,0225$ . . . . .	55
4. Таблица Garrett'a критическихъ уклоновъ для различныхъ расходовъ и глубинъ при коэффициентѣ шероховатости $n = 0,02$ . . . . .	55
5. Таблица Buckley'a незаилающихся руселъ каналовъ для Пенджаба . . . . .	56
6. Тоже для Синда . . . . .	56
7. Типичныя русла каналовъ по Buckley . . . . .	57





## В в е д е н і е.

Вопросъ о заиленіи ирригаціонныхъ каналовъ является самымъ серьезнымъ вопросомъ оросительной техники.

Неудачное разрѣшеніе этого вопроса ведетъ къ тяжелымъ эксплуатаціоннымъ результатамъ и даже грозитъ иногда смертью для ирригаціонной системы.

Наши рѣки южныхъ окраинъ Россіи и въ особенности Туркестана и Кавказа несутъ болѣе или менѣе значительныя количества наносовъ.

Индія со своими большими и давно существующими каналами разрѣшила многіе вопросы ирригаціонной практики, недостатокъ которой у насъ такъ сильно ощущается.

Вопросъ о заиленіи каналовъ особенно остро ставился на многихъ ирригаціонныхъ системахъ Индіи, что и привело англійскихъ инженеровъ къ нѣкоторымъ поучительнымъ результатамъ.

Среди бѣдной литературы по заиленію каналовъ нѣкоторыя монографіи индійскихъ инженеровъ занимаютъ особое положеніе, также какъ и работы Гидрометрической Части въ Туркестанскомъ Краѣ (особенно труды инженера В. Г. Глушкова).

Вопросъ о заиленіи каналовъ распадается на двѣ части:

1. Всѣ наносы, которые попадаютъ въ каналъ, должны быть вынесены на поля орошенія и отчасти сложены въ оросителяхъ.

Часть взвѣшенныхъ наносовъ рѣкъ обыкновенно отличается плодородными свойствами, и выносъ таковыхъ на поля орошенія отчасти возстановляетъ плодородіе почвъ.

Возможность допущенія отложенія наносовъ въ оросителяхъ объясняется легкостью очистки и тѣмъ, что эта очистка, обыкновенно, производится силами и средствами землепользователей.

2. Въ ирригаціонныя системы могутъ быть допущены только опредѣленные какъ по качеству, такъ и по количеству наносы, которые будутъ въ состояніи пройти черезъ всю систему каналовъ и распредѣлителей.

Первое условіе достигается выборомъ такихъ скоростей, которыя были бы достаточны для проноса насосовъ черезъ систему.

Для соблюденія второго условія практика выработала нѣкоторыя особенности въ устройствѣ головныхъ частей канала.

Вышеизложенное служить намъ основаніемъ подѣлить нашъ трудъ о заиленіи ирригаціонныхъ каналовъ на слѣдующіе три выпуска:

Выпускъ I. — Теорія заиленія Кеннеди.

Выпускъ II. — Особенности въ устройствѣ головныхъ сооружений ирригаціонныхъ каналовъ, въ цѣляхъ борьбы съ ихъ заиленіемъ.

Выпускъ III. — Дополнительные данныя, имѣющія соприкосновеніе съ вопросомъ о заиленіи.





## Изложеніе теоріи заиленія Кеннеди.

### Опытныя данныя, лежащія въ основаніи теоріи.

Въ 1894 году англійскій инженеръ Кеннеди (R. T. Kennedy) опубликовалъ свою теорію заиленія.

Онъ былъ Начальникомъ 3-ей дистанціи (Executive Engineer) на Бари-Доабскомъ каналѣ въ провинціи Пенджабъ.

При постройкѣ этого, одного изъ старѣйшихъ индійскихъ каналовъ еще неопытными англійскими инженерами были допущены многія ошибки. Инженеру Кеннеди пришлось проектировать переустройство многихъ распредѣлителей. Поставивъ рядъ наблюденій надъ ними, онъ стремился найти техническія основанія для ихъ переустройства. Въ результатъ явилась его теорія заиленія ирригаціонныхъ каналовъ.

Около 90 миль <sup>1)</sup> различныхъ распредѣлителей и часть главнаго канала были имъ подвергнуты систематическому изученію. Расходъ въ главномъ каналѣ достигалъ 1.700 куб. ф. с. (около 5 куб. сж. с.), а въ распредѣлителяхъ измѣнялся отъ 30 до 250 куб. ф. с.

Система заилялась, и на днѣ многихъ распредѣлителей были отложены наносы, толщиной слоя отъ 2 до 3 фут..

Тѣ мѣста, гдѣ отложеніе наносовъ прекратилось, и дно оставалось практически неизмѣннымъ, были выбраны инженеромъ Кеннеди для наблюденій.

Гидравлическія данныя такихъ установившихся пунктовъ являются искомыми и соотвѣтствующія скорости, которыя инже-

---

<sup>1)</sup> англійскихъ.

неръ Кеннеди называлъ критическими, обезпечиваютъ каналъ отъ заиленія, не производя въ то же время размыва дна.

Поперечныя сѣченія такихъ руселъ приближались къ прямоугольнику. Почти вертикальные боковые откосы были образованы мелкимъ иломъ, тогда какъ на днѣ имѣлся песокъ.

Количество наносовъ въ распредѣлителяхъ было болѣе или менѣе постоянно, по отношенію къ расходамъ воды въ нихъ. Во время большихъ паводковъ, когда въ систему попадало большое количество наносовъ, ихъ излишки, по сравненію съ нормальнымъ количествомъ, осѣдали въ главномъ каналѣ. Вмѣстѣ съ освѣтленіемъ воды отложившіеся наносы поднимались и переносились далѣе по системѣ. Можно, поэтому, приблизительно считать, что система Бари-Доабскаго канала находилась въ положеніи равновѣсія, съ точки зрѣнія насыщенности ея воды взвѣшенными наносами. И сумма количествъ взвѣшенныхъ наносовъ въ отдѣльныхъ распредѣлителяхъ должна быть близкой къ тому количеству наносовъ, которое проносится во взвѣшенномъ состояніи въ главномъ каналѣ. Отсюда слѣдуетъ, что при установившемся режимѣ системы отношеніе количества наносовъ къ несущему ихъ расходу воды постоянно.

Это отношеніе Кеннеди называетъ среднею полною насыщенностью наносами канала. Обозначимъ его буквой  $p$ .

Предположимъ, что имѣемъ каналъ съ расходомъ  $Q$ , при его насыщенности наносами  $p$  и систему распредѣлителей съ соотвѣтствующими давными  $q_1$  и  $p_1$ ,  $q_2$  и  $p_2$  и т. д.

Въ случаѣ равновѣсія системы должны имѣть:

$$Q \cdot p = q_1 \cdot p_1 + q_2 \cdot p_2 + q_3 \cdot p_3 + \dots \quad (I)$$

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots \quad (II)$$

Помножая уравненіе II на  $p$  и беря разность уравненій I и II, получимъ:

$$q_1 (p - p_1) + q_2 (p - p_2) + q_3 (p - p_3) + \dots = 0 \quad (III)$$

Значенія  $p + p_1 + p_2 + \dots$  не равны 0, слѣдовательно нѣкоторыя изъ значеній  $(p - p_1)$ ,  $(p - p_2)$ , ... должны быть положительными, а нѣкоторыя отрицательными. Иначе говоря, нѣкоторые распредѣлители должны имѣть воду, болѣе насыщенную наносами.



ТАБЛИЦА № 1.

ХАРАКТЕРЪ РУСЕЛЪ.	Расходъ (куб. ф. с.).	Ширина диа b (фут.).	Глубина воды d (фут.).	Средняя скорость V (фут. сек.).	Отношеніе b : d (2 : 3).	Критическая скорость $V_0$ по формулѣ Kennedy.	Разность между действительными скоростями и по формулѣ Kennedy (4—6).	Квадратъ разности (7 <sup>2</sup> ).
	1	2	3	4	5	6	7	8
Не было измѣненій въ теченіе многихъ лѣтъ.	1.250	70	6,5	2,81	10,8	2,78	+ 0,03	0,0009
	940	66	5,7	2,55	11,6	2,56	— 0,01	0,0001
Завленіе закончено.	940	66	5,5	2,55	12,0	2,50	+ 0,05	0,0025
	700	61	5,0	2,33	12,2	2,35	— 0,02	0,0004
	650	48	5,5	2,40	8,7	2,50	— 0,10	0,0100
	390	36	4,8	2,25	7,5	2,29	— 0,04	0,0016
	85	16	3,0	1,70	5,3	1,70	0,00	0,0000
	120	14	4,0	2,00	3,5	2,04	— 0,04	0,0016
	70	12	3,0	1,80	4,0	1,70	+ 0,10	0,0100
	220	22	4,5	2,15	5,0	2,20	— 0,05	0,0025
	75	14	3,0	1,70	4,7	1,70	0,00	0,0000
	65	15	2,6	1,60	6,0	1,55	+ 0,05	0,0025
	65	14	2,8	1,60	5,0	1,63	— 0,03	0,0009
	33	11	2,2	1,30	5,0	1,39	— 0,09	0,0081
	26	8	2,3	1,40	3,5	1,43	— 0,03	0,0009
	1.700	86	6,8	2,90	12,7	2,86	+ 0,04	0,0016
	1.700	85	7,0	2,86	12,1	2,92	— 0,06	0,0036
	1.700	84	6,9	2,91	12,2	2,89	+ 0,02	0,0004
	1.500	80	6,6	2,83	12,1	2,81	+ 0,02	0,0004
	1.250	68	6,7	2,75	10,1	2,84	— 0,09	0,0081
	142	18	3,9	1,90	4,7	2,01	— 0,11	0,0121
	138	18	3,6	2,04	5,0	1,91	+ 0,13	0,0169
Завленіе не закончено.	1.700	86	7,3	2,71				$\Sigma=0,0851$
	1.700	91	7,0	2,70				
	1.500	76	7,2	2,74				
	1.250	83	6,1	2,47				
	940	81	5,1	2,28				
	1.250	82	6,2	2,46				
	633	50	5,2	2,52				
	924	55	6,5	2,59				

При установившейся системѣ и при условіи ея рациональнаго проектированія такое предположеніе абсурдно. Слѣдовательно, заключаетъ Кеннеди, для удовлетворенія уравненія III нужно допустить  $(p - p_1)$ ,  $(p - p_2)$  . . . . равными нулю и  $p = p_1 = p_2 = \dots = \text{const.}$

Къ сожалѣнію, инженеромъ Кеннеди не было произведено механическихъ анализовъ наносовъ, несомыхъ рѣкою Bari и тѣхъ, которые имѣлись по системѣ Верхняго Бари-Доабскаго канала.

Наблюденія, легшія въ основу теоріи Кеннеди, приведены въ таблицѣ № 1. Всего 30 пунктовъ были подвергнуты систематическому наблюденію. Изъ нихъ въ 22 случаяхъ констатировался установившійся режимъ. Данныя этихъ наблюденій и послужили для вывода основнаго уравненія Кеннеди. Наблюденія же, числомъ 6, надъ не установившимися руслами дали лишь косвенныя доказательства правильности выведенныхъ зависимостей. Послѣднія двѣ точки взяты съ Верхняго Сетледжскаго канала.

## 2. Видъ формулы и кривая Кеннеди.

При установленіи зависимости критической скорости отъ факторовъ, вліяющихъ на ея величину, инженеръ Кеннеди указываетъ на сильную измѣняемость величины отношенія ширины живого сѣченія по дну къ глубинѣ воды при мало измѣняющемся значеніи критической скорости.

Напримѣръ, для пяти точекъ при измѣненіи вышеуказаннаго отношенія  $\left(\frac{b}{d}\right)$  отъ  $3\frac{1}{2}$  до 12 глубина воды непропорціонально мѣнялась отъ 3,9 до 5,0 и скорости отъ 1,90 фут. с. до 2,33. Отсюда инженеръ Кеннеди дѣлаетъ заключеніе, что отношеніе  $\frac{b}{d}$  не должно войти въ искомое взаимоотношеніе критической скорости отъ гидравлическихъ элементовъ русла и что эта скорость является, главнымъ образомъ, функціей глубины.

Отложивъ по оси абсциссъ значенія критической скорости и по оси ординатъ соотвѣтствующія глубины и соединивъ точки плавной кривой, инженеръ Кеннеди далъ ея уравненіе.



На чертежѣ 1 нами произведены соответствующія построения. Всѣ шесть точекъ, гдѣ заилненіе не закончено, расположились съ лѣвой стороны кривой, указывая на недостаточность величины средней скорости по сравненію съ глубинами.



**ПРИМѢЧАНІЕ:** ○ 22 точки — ЗАИЛНЕНИЕ ЗАКОНЧЕНО.  
+ 6 точекъ — ЗАИЛНЕНИЕ НЕ ОКОНЧЕНО.  
⊗ 2 точки Верхняго Сетлежскаго канала.

Уравненіе кривой  $V_0 = 0,84 d^{0,64}$  примѣнимо при глубинахъ, измѣняющихся отъ 2,2 до 7 фут.. Въ этихъ предѣлахъ зависимость устанавливается экстерполяціоннымъ путемъ.

Для сужденія о степени погрѣшности уравненія Кеннеди нами исчислены послѣдніе два столбца табл. 1.

Средняя квадратичная ошибка  $\Delta = 0,063$ .

### 3. Насыщенность потока наносами.

При выводѣ формулы  $V_0 = cd^m = 0,84 d^{0,64}$ , относящейся къ каналамъ, гдѣ наблюдалось равновѣсіе съ точки зрѣнія ихъ заилненія насыщенность наносами  $p$  принималась постоянной.

Но степень насыщенія мѣняется въ зависимости отъ механическаго состава наносовъ, растеть вмѣстѣ съ углубленіемъ отъ поверхности и, вообще, зависитъ отъ гидравлическихъ элементовъ живого сѣченія.

Можно приблизительно считать, что количество наносовъ, несомыхъ даннымъ водотокомъ, будетъ пропорціонально средней скорости въ нѣкоторой степени  $n$  и выразится формулой  $\alpha \cdot b \cdot V_0^n$ , гдѣ  $\alpha$  нѣкоторый постоянный коэффиціентъ.

Съ другой стороны для выраженія этого же количества имѣемъ выраженіе  $p \cdot Q$ , гдѣ  $Q$  расходъ.

$$\text{Отсюда } \alpha \cdot b \cdot V_0^n = p Q \dots\dots\dots (IV).$$

Обыкновенно русла дѣйствующихъ каналовъ близки къ прямоугольнику. Тогда расходъ  $Q = b \cdot d \cdot V_0$ .

Подставляя значеніе  $Q$  въ уравненіе IV, имѣемъ:

$$\alpha \cdot b \cdot V_0^n = p \cdot b \cdot d \cdot V_0 \text{ или}$$

$$\alpha \cdot V_0^{n-1} = p \cdot d \text{ или}$$

$$V_0 = \left( \frac{p}{\alpha} \cdot d \right)^{\frac{1}{n-1}} \dots\dots\dots (V).$$

Общій видъ послѣдняго уравненія указываетъ на его тождественность съ уравненіемъ  $V_0 = cd^m = 0,84 d^{0,64}$ , полученнымъ опытнымъ путемъ.

Для опредѣленія значенія  $n$  имѣемъ:

$$\frac{1}{n-1} = m = 0,64 \text{ или } n = 2,56 = \text{около } \frac{5}{2}.$$

Такъ что, переносящая наносы сила пропорціональна средней скорости въ степени  $\frac{5}{2}$ .

Значенія  $p$  и  $\alpha$  очень мало измѣняются, если мало измѣняется механическій составъ взвѣшенныхъ наносовъ.



Кеннеди также опредѣляетъ то количество наносовъ, которое будетъ осѣдать или подниматься вмѣстѣ съ измѣненіями скорости.

Называя  $p_x$  насыщенность потока при скорости  $V$  и соответственно  $p$  при  $V_0$  (критической) и полагая, что сила переносящая наносы пропорціональна  $V^{\frac{5}{2}}$ , будемъ имѣть  $p : V_0^{\frac{5}{2}} = p_x : V^{\frac{5}{2}}$  откуда:

$$p_x = p \cdot \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\frac{5}{2}} \dots \dots \dots (VI).$$

Количество осѣдающихъ или поднимаемыхъ наносовъ будетъ пропорціонально значенію  $(p - p_x)$  или  $p \left[ 1 - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\frac{5}{2}} \right]$ .

Значеніе  $\frac{p - p_x}{p}$  будетъ указывать на скорость измѣненія насыщенности потока наносами въ зависимости отъ измѣненія скоростей въ немъ.

Ниже приводятся различныя значенія величины  $\frac{p - p_x}{p}$  въ зависимости отъ измѣненія отношенія  $\frac{V}{V_0}$ .

$\frac{V}{V_0}$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,0
$\frac{p - p_x}{p}$	1,00	0,996	0,983	0,951	0,899	0,823	0,722	0,592	0,429	0,233	0,10

Въ случаѣ невозможности запроектировать уклонъ для канала достаточно большимъ для полученія въ немъ критическихъ скоростей необходимо выбрать живое сѣченіе съ минимальнымъ заиленіемъ. Это будетъ удовлетворено при минимальномъ значеніи разности  $(p - p_x)$ .

Но  $p - p_x = p \left[ 1 - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\frac{5}{2}} \right] = p \left[ 1 - \left( \frac{V}{c d^m} \right)^{\frac{5}{2}} \right]$  будетъ минимумъ при наибольшемъ значеніи выраженія  $\frac{V}{c d^m}$ .

Въ случаѣ прямоугольнаго русла мы имѣли  $Q = b \cdot d \cdot V$ , откуда:  $V = \frac{Q}{bd}$  и  $\frac{V}{c d^m} = \frac{Q}{c \cdot b \cdot d^{m+1}}$ .

Послѣднее выраженіе, при заданномъ расходѣ  $Q$  и постоянномъ значеніи  $c$ , будетъ имѣть наибольшее значеніе тогда, когда вы-

раженіе  $bd^{m+1} = bd^{0,64+1} = bd^{1,64}$  станетъ минимумомъ. Въ этомъ случаѣ живое сѣченіе канала будетъ имѣть наименьшую заиленность.

Пользуясь вышеприведенными формулами, не трудно опредѣлить количество выпадающихъ изъ потока наносовъ при уменьшеніи скорости его теченія.

Сохраняя предыдущія обозначенія, примемъ:

для канала, при низкихъ расходахъ:  $p_1, Q_1, d_1, V_1$

для канала, при высокихъ расходахъ:  $p_2, Q_2, d_2, V_2$

для рѣки:  $p, Q, d, V$ .

Причемъ  $p > p_2 > p_1$ .

Количество наносовъ, которое осядетъ, будетъ равно:

$$Q_1 \left[ p_1 - p \left( \frac{V_1}{c \cdot d_1^m} \right)^{5/2} \right] \text{ и } \\ Q_2 \left[ p_2 - p \left( \frac{V_2}{c \cdot d_2^m} \right)^{5/2} \right]$$

Въ случаѣ равенства  $p_2 = p_1 = p$  и ширинѣ постели канала  $b = 200$  фут. количество наносовъ, осѣвшихъ при глубинѣ канала въ 7 фут., будетъ въ 1,69 раза болѣе, нежели при глубинѣ въ 5 футъ.

#### 4. Классы наносовъ, соответствующіе критической скорости.

Выше было указано, что при наблюденіяхъ за Бари-Доабской ирригаціонной системой инженеръ Кеннеди не производилъ механическихъ анализовъ наносовъ. Поэтому, когда возникъ вопросъ о примѣненіи его уравненія  $V_0 = 0,84 d^{0,64}$  въ другихъ районахъ, сдѣлалось необходимымъ знать тѣ классы наносовъ, для которыхъ уравненіе Кеннеди примѣнимо. И лишь на основаніи дальнѣйшихъ наблюденій, главнымъ образомъ, на рѣкѣ Сетледжѣ и Сиргиндскомъ каналѣ этотъ вопросъ нѣсколько разъяснился.

Въ выпускѣ II «Особенности въ устройствѣ головныхъ сооружений ирригаціонныхъ каналовъ, въ цѣляхъ борьбы съ ихъ заиленіемъ» будутъ приведены методы анализовъ наносовъ. Здѣсь же необходимо указать на принятую англійскими инженерами классификацію наносовъ по ихъ гидравлической



крупности, т. е. по скорости осѣданія ихъ частицъ въ спокойной водѣ. Такъ  $\frac{0,1}{0,2}$  обозначаетъ классъ наносовъ, частицы которыхъ осѣдаютъ въ водѣ со скоростями между 0,1 фута въ секунду и 0,2 фута въ секунду.

Кеннеди считаетъ, что его критической скорости по уравненію  $V = 0,84 d^{0,64}$  приблизительно соответствуютъ наносы <sup>1)</sup>:

Классъ песка.	$\frac{0,00}{0,05}$	$\frac{0,05}{0,10}$	$\frac{0,10}{0,15}$	$\frac{0,15}{0,20}$	$\frac{0,20}{0,30}$	$\frac{0,30}{0,40}$	$\frac{0,40}{0,50}$
Рѣка Сетледжъ (въ процентахъ) . . . . .	11	43	25	11	7	2	1
Рѣка Ченабъ (въ процентахъ) . . . . .	11	28	27	15	14	4	1

При этомъ, какъ видно изъ чертежа 2, дающаго графическое изображеніе анализовъ, наносы рѣкъ Сетледжа и Ченаба были взяты съ ихъ дна. Въ тѣсной зависимости отъ крупности наносовъ находится ихъ количество, которое взвѣшивается при опредѣленной средней скорости. Чѣмъ крупнѣе наносы, тѣмъ меньшее ихъ количество по объему будетъ нестись потокомъ при одной и той же средней скорости. Напримѣръ, при наблюденіяхъ надъ Сиргиндскимъ каналомъ его полная насыщенность песчаными наносами мѣнялась отъ  $\frac{1}{3300}$  до  $\frac{1}{9000}$  по объему, въ зависимости отъ ихъ крупности. Въ дальнѣйшемъ изложеніи будутъ приведены теоретическія объясненія этого явленія.

## 5. Возраженія инженера Т. Higham'a противъ теоріи заиленія Кеннеди.

Изъ многочисленныхъ возраженій, сдѣланныхъ различными авторами противъ теоріи заиленія Кеннеди, наибольшаго вниманія по своей полнотѣ заслуживаютъ данныя инженера Higham'a, бывшаго главнымъ инженеромъ въ провинціи Пенджабъ въ моментъ появленія теоріи Кеннеди.

<sup>1)</sup> Наносы измѣрялись по объему.





Ссылаясь на цѣлый рядъ авторитетовъ, Higham указываетъ, что переносящая наносы сила воды пропорціональна шестой степени средней скорости, а не  $V^{\frac{5}{2}}$ , какъ то слѣдуетъ по Кеннеди. Далѣе Higham беретъ изъ діаграммъ Кеннеди русло въ 60 фут. по дну, съ уклономъ 1:5714. При послѣдовательномъ увеличеніи расхода въ этомъ руслѣ будемъ имѣть слѣдующіе результаты:

Для расхода  $Q$ , меньшаго 137 куб. ф. с., при глубинѣ  $d = 1,9$  фута скорость будетъ менѣе критической, и каналъ будетъ заилиться.

При увеличеніи расхода до  $Q = 260$  куб. ф. с., при  $d = 3$  фут., разность между средней скоростью и критической будетъ имѣть максимальное значеніе, т. е. сила взвѣшиванія наносовъ будетъ наибольшей, хотя насыщенность потока будетъ не болѣе, чѣмъ въ 2 раза болѣе таковой при глубинѣ  $d = 1,9$  фут..

При дальнѣйшемъ увеличеніи расхода до  $Q = 1.100$  куб. ф. с. при  $d = 6,75$  фут. сила взвѣшиванія наносовъ начнетъ уменьшаться, и при расходахъ  $Q > 1.100$  куб. фут. с. каналъ снова станетъ заилиться.

Этотъ «курьезный» результатъ, заключаетъ Higham, явился слѣдствіемъ теоріи Кеннеди и противорѣчитъ тому, что встрѣчается на практикѣ.

Ссылаясь на одну изъ статей въ «Indian Engineering», Higham говоритъ о вліяніи формы поперечнаго сѣченія русла канала на переносящую наносы силу воды и степень заиленія каналовъ, связывая съ этимъ вопросомъ и измѣняемость коэффиціента шероховатости, и указываетъ на спорность допущенія о томъ, что насыщенность наносами ирригаціонной системы  $p$  есть для нея величина постоянная.

Говоря о примѣнимости теоріи Кеннеди къ практикѣ ирригаціоннаго дѣла, Higham считаетъ, что живыя сѣченія большихъ каналовъ выбираются на основаніи многихъ практическихъ указаній, а при проектированіи малыхъ каналовъ имѣютъ наибольшее значеніе потери на фильтраціи.

## 6. Пользованіе теоріей заиленія Кеннеди и практическіе коэффиціенты.

Несмотря на цѣлый рядъ сдѣланныхъ существенныхъ возраженій противъ теоріи заиленія Кеннеди, она пользуется въ Индіи самымъ широкимъ примѣненіемъ.

Ссылки же на нее и описаніе мы встрѣчаемъ во всѣхъ болѣе или менѣе серьезныхъ трудахъ по ирригаціи.

Нѣкоторые инженеры дѣлають попытки примѣнить эту теорію даже къ режиму большихъ рѣкъ.

Однако, въ зависимости отъ характера наносовъ и отчасти размѣровъ канала формулу Кеннеди видоизмѣняютъ, помножая полученную изъ нея критическую скорость на различные коэффиціенты.

Такъ, напримѣръ, Garret въ зависимости отъ характера наносовъ, при полной насыщенности ими канала, рекомендуетъ слѣдующіе коэффиціенты:

Для очень легкихъ песчаныхъ наносовъ рѣкъ Сѣверной Индіи. . . . .	1,0
Для нѣскольکو крупнѣе легкихъ песчаныхъ наносовъ . . . . .	1,10
Для крупныхъ песчаныхъ наносовъ . . . . .	1,20
Для самыхъ крупныхъ песчаныхъ наносовъ. . . .	1,30

Съ другой стороны мы встрѣчаемъ указанія Buckley на то, что для каналовъ провинціи Синдъ, берущихъ начало изъ Инда, вышеуказанный коэффиціентъ можетъ быть принятъ равнымъ 0,75, а для каналовъ Египта даже 0,66. Thrupp даетъ нижеслѣдующую табличку значенія скоростей ( $V$ ) въ фут. сек. въ зависимости отъ глубины ( $d$ ) въ фут.:

Для  $d=1$  футъ. . . . . Для  $d=10$  футъ.

1. Для крупнаго песка:

$V$  = отъ 1,5 до 2,3 . . . . . Отъ 3,5 до 4,5.

2. Для тяжелаго ила или мелкаго песка:

$V$  = отъ 0,95 до 1,5 . . . . . Отъ 2,3 до 3,5.

3. Для легкаго ила:

$V$  = отъ 0,45 до 0,95 . . . . . Отъ 1,2 до 2,3.



Соотвѣтствующая же критическая скорость по формулѣ Кеннеди для глубины  $d = 1$  будетъ  $V_0 = 0,84$  и для  $d = 10$  фут.  $V_0 = 3,67$  фут. с..

При выборѣ критическихъ скоростей также принимаются во вниманіе размѣры каналовъ, и часто для магистралей и крупныхъ вѣтвей задаютъ коэффициенты отъ 1,10 до 1,20, а для оросителей 0,70—0,80. При этомъ, конечно, учитывается и то обстоятельство, что оросительная система въ своемъ началѣ имѣетъ обыкновенно болѣе крупныя фракціи наносовъ.

Столь разнообразныя коэффициенты и, главное, неопредѣленность условий ихъ примѣненія находятъ свое объясненіе въ трудности и сложности изслѣдованія и классификаціи наносовъ.

Это, однако, не останавливаетъ англійскихъ инженеровъ Инди и другихъ странъ отъ широкаго пользованія теоріей Кеннеди, что въ значительной степени облегчаетъ ихъ задачи по борьбѣ съ заиленіемъ каналовъ.

Далѣе мы изложимъ наши размышленія по поводу теоріи заиленія Кеннеди, разсмотримъ ея приложеніе къ проектированію каналовъ и дадимъ общее выраженіе для уравненія заиленія.



## Приложеніе теоріи Кеннеди къ проектированію каналовъ.

Среди ряда условій, которымъ должны удовлетворять каналы, требованіе о незаиляемости ихъ живыхъ сѣченій является однимъ изъ наиболѣе существенныхъ. Если средняя скорость въ каналѣ больше критической и ея значеніе менѣе размывающихъ скоростей для тѣхъ грунтовъ, гдѣ проведенъ каналъ, то его русло будетъ находиться въ устойчивомъ положеніи.

Извѣстно, что для расчета живого сѣченія каналовъ имѣемъ слѣдующія два уравненія:

$$V = C \sqrt{R i} \dots\dots\dots (VII)$$

$$D = W \cdot V \dots\dots\dots (VIII)$$

въ которыхъ заключаются слѣдующія семь основныхъ неизвѣстныхъ: (черт. 3).



Черт. 3.

$D$  — расходъ воды въ каналѣ.

$V$  — средняя скорость.

$i$  — уклонъ.

$n$  — коэффициентъ шероховатости.

$m$  — заложеніе боковыхъ откосовъ.

$b$  — ширина по дну.

$d$  — глубина воды въ каналѣ.



Эти неизвѣстныя могутъ задаваться и въ другой комбинаціи. Напримѣръ, будетъ извѣстно значеніе  $R$ —гидравлическаго радіуса или же  $W$ —площади живого сѣченія. Однако, число неизвѣстныхъ будетъ не менѣе семи. Слѣдовательно, для рѣшенія двухъ уравненій VII и VIII-го необходимо задаться значеніями пяти гидравлическихъ элементовъ.

Въ случаѣ заданія какого-либо условія, дополнительно связывающаго неизвѣстныя, будемъ имѣть лишнее уравненіе, и число произвольно выбираемыхъ гидравлическихъ элементовъ канала будетъ уменьшено.

Уравненіе Кеннеди:

$$V_0 = 0,84 d^{0,64} \dots \dots \dots (IX)$$

является такимъ дополнительнымъ уравненіемъ.

Подставивъ въ уравненіе VIII значеніе скорости изъ уравненія IX и вмѣсто площади живого сѣченія ея выраженіе

$$W = (b + m d) d,$$

получимъ:

$$D = 0,84 (b + m d) d^{1,64} \dots \dots \dots (X)$$

Подставивъ значеніе скорости изъ уравненія IX въ уравненіе VII, получимъ:

$$0,84 d^{0,64} = \sqrt{C} \sqrt{R i} \dots \dots \dots (XI)$$

Послѣднія два уравненія или первыя три послужатъ для рѣшенія задачи о незапняемости русла.

### 1. Критическій уклонъ.

Значеніе гидравлическаго радіуса  $R = \frac{W}{p}$  или

$$R = \frac{(b + m d) d}{b + 2 d \sqrt{1 + m^2}} \dots \dots \dots (XII)$$

Изъ уравненія XI имѣемъ:

$$i = \frac{0,84^2 d^{1,28}}{C^2 R}$$

или, подставляя значеніе гидравлическаго радіуса изъ уравненія XII, получимъ:

$$i = \frac{0,84^2 d^{0,28} [b + 2 d \sqrt{1 + m^2}]}{C^2 (b + m d)} \dots \dots \dots (XIII)$$

Изъ уравненія X имѣемъ:

$$b + m d = \frac{D}{0,84 d^{1,64}} \dots \dots \dots (XIV)$$

$$b = \frac{D}{0,84 d^{1,64}} - m d \dots \dots \dots (XV)$$

Подставляя эти послѣднія выраженія XIV и XV въ уравненіе XIII, получимъ для уклона слѣдующее значеніе:

$$i = \frac{0,84^3 d^{1,92}}{C^2 D} \left[ \frac{D}{0,84 d^{1,64}} - d (m - 2 \sqrt{1 + m^2}) \right] \dots (XVI)$$

Для прямоугольнаго сѣченія  $m = 0$  и

$$i = \frac{0,84^3 d^{1,92}}{C^2 D} \left[ \frac{D}{0,84 d^{1,64}} + 2d \right] \dots \dots \dots (XVI_1)$$

Значеніе коэффициента  $C$  по Базену не зависитъ отъ величины уклона.

Пользуясь же для опредѣленія  $C$  формулой Гангилъе и Куттера, проще значеніе уклона  $i$  опредѣлять изъ уравненія VII по заданной скорости и значенію подводнаго радіуса.

Изъ этого уравненія имѣемъ:

$$i = \frac{V^2}{C^2 R} \dots \dots \dots (XVII)$$

Задаваясь произвольнымъ значеніемъ для уклона  $i$ , опредѣляемъ соотвѣтствующее значеніе коэффициента  $C$  и изъ уравненія XVII его болѣе точное значеніе, которое въ свою очередь послужитъ для опредѣленія значенія  $i$  и т. д.

Вышеприведенныя уравненія даютъ то минимальное значеніе для уклона, при которомъ не должно быть заиленія. Этотъ уклонъ мы назовемъ критическимъ.

Изъ уравненій XVI и XVI<sub>1</sub> слѣдуетъ, что значеніе этого уклона растеть вмѣстѣ съ увеличеніемъ глубины и уменьшается при увеличеніи значенія расхода.

Возьмемъ примѣръ.

Дано  $b = 60$  фут.;  $d = 6$  фут.;  $V_0 = 2,64$  фут. сек.;  $m = 1$ .

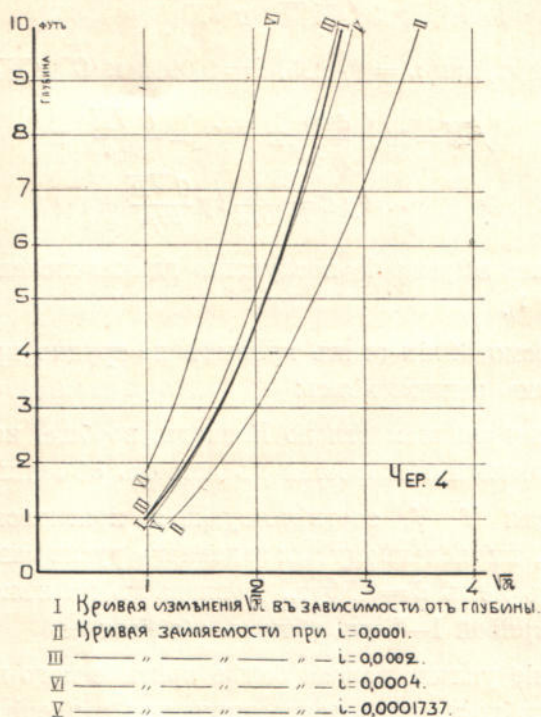
Имѣемъ:  $\sqrt{R} = 2,268$

Для перваго приближенія примемъ  $i = 0,0002$ , тогда  $C \sqrt{R} = 198,888$  и  $\sqrt{i} = \frac{V_0}{C \sqrt{R}} = \frac{2,64}{198,888} = 0,01327$ .

$i = 0,0001761$ .



Болѣе точное значеніе критическаго уклона  $V \bar{i} = \frac{2,64}{200,23} = 0,01318$  и  $i = 0,0001737$ .



Для того, чтобы наглядно представить себѣ значеніе критическаго уклона, на черт. 4 построены слѣдующія кривыя для данныхъ вышевзятаго примѣра:

I—I. Кривая измененія значенія  $\sqrt{R}$  въ зависимости отъ глубины воды въ каналѣ  $d$ .

Уравненіе кривой:

$$\sqrt{R} = \sqrt{\frac{(b + m d) d}{b + 2 d \sqrt{1 + m^2}}}$$

Для одиночныхъ откосовъ  $m = 1$  и

$$\sqrt{R} = \sqrt{\frac{(b + d) d}{b + 2 d \sqrt{2}}}$$

Кривая построена по даннымъ таблицы № 8 Флинна.

II—II, III—III, IV—IV, V—V—кривыя, построенныя для различныхъ значеній уклона  $i$  по уравненію:

$$\sqrt{R} = \frac{0,84 d^{0,64}}{C \sqrt{i}}$$

Напримѣръ, при  $n = 0,0225$ ,  $i = 0,0002$  и  $C \sqrt{R} = 198,888$

$$\sqrt{R} = 59,4 \frac{d^{0,64}}{C} \text{ и } d^{0,64} = \frac{C \sqrt{R}}{59,4} \text{ и}$$

$$\lg d = \frac{1}{0,64} \lg \frac{C \sqrt{R}}{59,4}$$

Послѣднее выраженіе послужило для вычисленій и построеній кривыхъ <sup>1)</sup>.

При разсмотрѣніи этихъ кривыхъ не трудно придти къ нижеслѣдующимъ заключеніямъ:

1. Кривыя заиляемости по Кеннеди, вообще, не совпадаютъ съ кривой измѣненія скоростей въ живомъ сѣченіи русла.

2. Кривая V—V, соответствующая критическому уклону  $i = 0,0001737$ , вычисленному для заданнаго русла канала при глубинѣ воды въ немъ  $d = 6$  фут., совпадаетъ на нѣкоторомъ протяженіи съ кривой I—I, въ общемъ объемля ее.

3. Заданіе уклона канала болѣе критическаго приводитъ къ болѣе способности русла сопротивляться заиленію.

Кривыя, расположившіяся съ лѣвой стороны отъ кривой I—I, напр. IV—IV для  $i = 0,0004$ , дадутъ значенія скоростей въ живомъ сѣченіи болѣе критическихъ.

Кривая III—III, отвѣчающая уклону  $i = 0,0002$ , пересѣчетъ кривую I—I въ точкахъ, координаты которыхъ могутъ быть вычислены изъ уравненія:

$$\sqrt{\frac{(b+d)d}{b+2d}} = 59,4 \frac{d^{0,64}}{C}$$

При наполненіи канала до глубинъ, заключенныхъ между точками пересѣченія, заиленія происходитъ не должно. Виѣ предѣловъ этихъ точекъ, какъ будто, заиленіе должно имѣть мѣсто. На это противорѣчіе указалъ и Higham.

<sup>1)</sup> Таблицы вычисленій, какъ не имѣющія особаго интереса, не печатаются.



4. Уменьшеніе уклона ниже критическаго приводитъ къ заиленію русла. При этомъ вмѣстѣ съ увеличеніемъ глубины воды въ такомъ руслѣ степень его заиленія будетъ увеличиваться. Это обстоятельство, между прочимъ, указываетъ на безполезность увеличенія въ такомъ случаѣ попусковъ воды въ каналъ въ цѣляхъ уменьшенія заиленія его русла, конечно, при условіи постоянства въ насыщенности воды наносами <sup>1)</sup>.

## 2. Критическая ширина по дну русла канала.

Вліяніе на заиленіе каналовъ характера живого сѣченія русла инженеръ Кеннеди исключилъ чисто эмпирическимъ путемъ, ограничившись указаніемъ на данныя его опытовъ.

Согласно уравненію

$$V = C \sqrt{R} \sqrt{i}$$

значеніе скорости  $V$ , при постоянныхъ уклонѣ и коэффициентѣ шероховатости, опредѣляется значеніемъ выраженія  $C \sqrt{R}$ .

Всматриваясь, напримѣръ, въ таблицы Флинна, дающія величину  $C \sqrt{R}$ , легко видѣть, что на значеніе  $C \sqrt{R}$  мало вліяетъ измѣненіе уклона. При нѣкоторомъ же значеніи  $\sqrt{R}$ , напримѣръ, равнымъ 1,8 величина  $C \sqrt{R}$  почти не измѣнится.

Въ самомъ дѣлѣ имѣемъ:

при уклоне  $i = 0,00015$  значеніе  $C \sqrt{R} = 144,4$

$$i = 0,000063131 \dots \dots \dots C \sqrt{R} = 144,4$$

$$i = 0,0001 \dots \dots \dots C \sqrt{R} = 144,5$$

$$i = 0,0001333 \dots \dots \dots C \sqrt{R} = 144,5$$

$$i = 0,0002 \dots \dots \dots C \sqrt{R} = 144,5$$

$$i = 0,0003 \dots \dots \dots C \sqrt{R} = 144,4$$

$$i = 0,0004 \dots \dots \dots C \sqrt{R} = 144,5$$

$$i = 0,0006 \dots \dots \dots C \sqrt{R} = 144,5$$

$$i = 0,0008 \dots \dots \dots C \sqrt{R} = 144,5$$

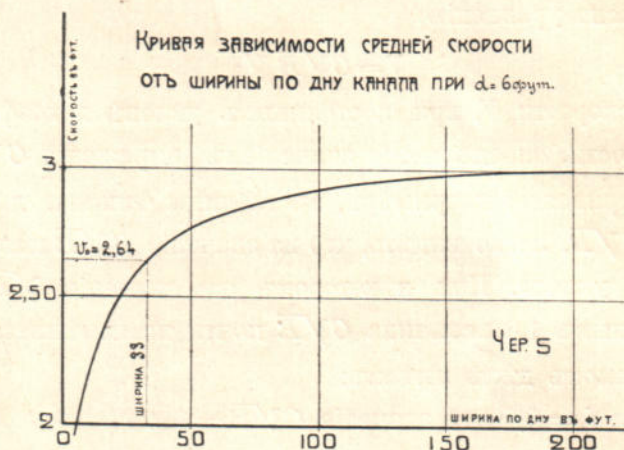
$$i = 0,001 \dots \dots \dots C \sqrt{R} = 144,5$$

<sup>1)</sup> На вопросъ о дѣйствии сбросо-промывныхъ шлюзовъ на очистку отъ отложившихся наносовъ я болѣе подробно остановлюсь въ 3-мъ изданіи.

Для одного и того же значенія  $\sqrt{R} = 1,8$  мы будемъ имѣть много руселъ съ различными гидравлическими элементами. При глубинѣ, близкой къ вышевзятому примѣру, будемъ имѣть также множество живыхъ сѣченій, у которыхъ отношеніе ширины къ глубинѣ можетъ измѣняться отъ 1 до 100 при измѣненіи глубины лишь въ два раза.

Отсюда ясно, что отношеніе ширины къ глубинѣ канала не сильно вліяетъ на значеніе скорости и, слѣдовательно, общая форма живого сѣченія, поскольку ее опредѣляетъ вышеуказанное отношеніе, мало отражается на процессѣ заиленія.

Возьмемъ старый примѣръ русла съ глубиной  $d = 6$  фут. и построимъ кривую зависимости средней скорости отъ ширины по дну канала для уклона  $i = 0,0002$  (черт. 5).



Незначительное увеличеніе уклона до 0,0002 по сравненію съ вычисленнымъ критическимъ  $i = 0,0001737$  приводитъ къ меньшей ширинѣ русла канала для соблюденія условія его незаиляемости.

Эта ширина по дну въ 33 фута будетъ для данныхъ взятаго примѣра критической шириной. Всѣ сѣченія, имѣющія ширину болѣе 33 фут., дадутъ значеніе скоростей болѣе критическихъ и наоборотъ. При этомъ паденіе значенія скорости при уменьшеніи ширины по дну происходитъ быстрѣе, нежели увеличеніе скорости при соответствующемъ расширеніи канала. Отсюда напрашивается выводъ, что болѣе широкія русла должны оказывать большее сопротивленіе заиленію.

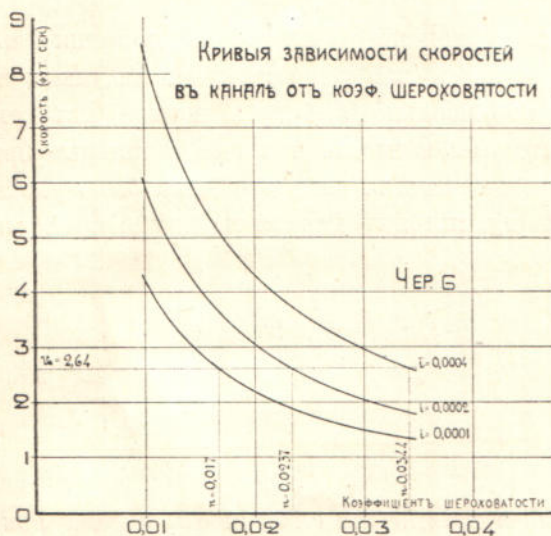


Значеніе критической ширины канала по дну, при заданных величинах глубины  $d$  и уклона  $i$ , опредѣлится изъ предыдущихъ уравненій.

### 3. Коэффициентъ шероховатости.

Значеніе коэффициента шероховатости вліяетъ на значеніе скорости, опредѣляя коэффициентъ  $C$  въ уравненіи  $V = C \sqrt{Ri}$ .

Для иллюстраціи этого вліянія построены кривыя зависимости скоростей въ каналѣ отъ коэффициента шероховатости для уклоновъ:  $i = 0,0004$ ,  $i = 0,0002$  и  $i = 0,0001$  (черт. 6), для данныхъ стараго примѣра.



Прямая  $V_0 = 2,64$  фут. сек. параллельная оси абсциссъ пересѣкаетъ эти кривыя въ точкахъ, которымъ соответствуютъ слѣдующія значенія коэффициентовъ шероховатости:

для кривой уклона  $i = 0,0004$  . . . . .  $n = 0,0344$

» » »  $i = 0,0002$  . . . . .  $n = 0,0237$

» » »  $i = 0,0001$  . . . . .  $n = 0,017$

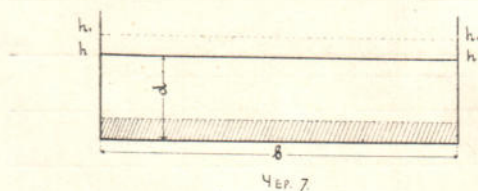
Если бы мы построили кривую, соответствующую критическому уклону  $i = 0,0001737$ , то получили бы величину  $n = 0,0225$ , т. е. то значеніе для  $n$ , которое было положено въ основаніе вычисления.

При заданіи уклоновъ большихъ нежели критическіе можемъ въ дѣйствительности имѣть русло въ худшемъ состояніи по сравненію съ предположеннымъ, и все же оно заилѣться не будетъ. При меньшихъ уклонахъ необходимо принимать всѣ мѣры къ увеличенію значенія коэффиціента шероховатости.

Вышеприведенныя значенія коэффиціентовъ шероховатости, соотвѣтствующія критической скорости и заданнымъ элементамъ живого сѣченія, можно назвать критическими, такъ какъ эти значенія являются предѣльными, опредѣляющими начало процесса заиленія.

#### 4. Процессъ заиленія каналовъ.

Принимая уравненіе Кеннеди за дополнительное условіе къ двумъ основнымъ для расчета каналовъ, намъ все же необходимо было произвольно выбирать четыре (изъ семи) значенія гидравлическихъ элементовъ, и тогда остальные принимали отѣнки критическихъ, какъ это нами было указано по отношенію къ уклону, ширинѣ канала по дну и коэффиціенту шероховатости.



Наибольшее вліяніе на способность канала сопротивляться заиленію оказываютъ значеніе уклона и коэффиціентъ шероховатости.

Естественно предположить, что процессъ заиленія каналовъ носить, какъ и многія явленія природы, саморегулирующій характеръ. Иначе говоря, по мѣрѣ хода заиленія русла въ немъ должны развиваться тенденціи къ прекращенію этого процесса.

Установившіяся русла каналовъ близки къ прямоугольнымъ, поэтому разсужденія по отношенію къ послѣднимъ могутъ болѣе или менѣе освѣтить процессъ заиленія.

Положимъ имѣемъ русло (черт. 7) шириною  $b$  и глубиною  $d$ , при скорости теченія  $V$  меньшей критической  $V_0$ .



Это вызоветъ отложеніе наносовъ и подъемъ горизонта воды въ каналъ съ  $hh$  до  $h_1h_1$ .

При неизмѣняемости гидравлическихъ элементовъ взаимоотношеніе между значеніемъ скорости и глубиной воды остается тѣмъ же самымъ и процессъ заиленія сохранить свою интенсивность.

Значеніе скорости можетъ увеличиться или при увеличеніи уклона, или при уменьшеніи коэффиціента шероховатости.

Эти два явленія мы, главнымъ образомъ, и наблюдаемъ при заиленіи каналовъ. Наносы складываются подъ нѣкоторымъ уклономъ, крутизна котораго постепенно, по мѣрѣ приближенія процесса заиленія къ концу канала, уменьшается, достигая своего критическаго значенія. Въ мѣстѣ съ этимъ уменьшается значеніе коэффиціента шероховатости <sup>1)</sup>. Однако, измѣненія послѣдняго происходятъ въ довольно ограниченныхъ предѣлахъ, поэтому главное значеніе въ процессѣ заиленія приобретаетъ уклонъ.

При постоянствѣ расхода въ каналъ увеличеніе скорости вызоветъ уменьшеніе глубины воды въ руслѣ, что приводитъ къ болѣе быстрой остановкѣ процесса заиленія, уменьшая его силу.

Эта сила измѣняется разностью между критическими и дѣйствительными скоростями. Въ случаѣ трапеціадальнаго сѣченія русла канала въ мѣстѣ съ ростомъ заиленія уменьшается сила заиленія, въ чемъ заключается также одна изъ тенденцій къ его прекращенію.

Вообще же нужно сказать, что въ случаѣ малыхъ уклоновъ той мѣстности, гдѣ проектируется ирригаціонная система, заиленіе каналовъ можетъ привести къ крайне плачевнымъ результатамъ. Въ этомъ случаѣ рациональное устройство головныхъ сооружений канала приобретаетъ особо важное значеніе.

## 5. Уравновѣшенное русло канала.

При выборѣ живого сѣченія канала необходимо стремиться, чтобы его русло не размывалось и не заилялось, т. е. находилось бы въ уравновѣшенномъ состояніи. При этомъ даже допустимо нѣкоторое отложеніе наносовъ въ руслѣ каналовъ съ тѣмъ,

<sup>1)</sup> Этого вопроса я коснусь еще въ выпускѣ III.

чтобы при освѣтленіи поступающей въ систему воды эти наносы поднимались со дна каналовъ и проносились на оросительное поле.

Стремленіе къ уравниванію русла канала приводитъ къ двумъ противоположнымъ требованіямъ по отношенію къ средней скорости. Малыя скорости предохраняютъ русла каналовъ отъ размывовъ. Большія же скорости обезпечиваютъ отъ заиленія. Большія скорости выгоднѣе и съ точки зрѣнія болѣе экономнаго проектированія каналовъ.

Поэтому рекомендуется задавать нѣсколько болѣшія скорости, ибо борьба съ размывомъ канала вообще легче, нежели съ его заиленіемъ.

Съ увеличеніемъ глубины въ каналѣ, согласно теоріи Кеннеди, необходимы и болѣшія критическія скорости. Однако, предѣломъ для таковыхъ явятся скорости, допустимыя въ грунтахъ, которые пересѣкаетъ каналъ.

Для обыкновенныхъ грунтовъ наибольшая допускаемая скорость, при которой не будетъ размывовъ, будетъ равна около 3—3,3 фута въ секунду, и соотвѣтствующая этой скорости глубина воды въ каналѣ не должна (по формулѣ Кеннеди) превышать 8—9 футовъ.

Въ случаѣ примѣненія къ формулѣ Кеннеди поправочныхъ коэффиціентовъ, эта предѣльная глубина можетъ увеличиться или уменьшиться. При наносахъ мелкихъ фракцій требуются меньшія значенія для критическихъ скоростей, при этомъ глубина воды въ каналѣ можетъ возрастать и наоборотъ.

Такимъ образомъ, мы приходимъ къ выводу: механическій составъ наносовъ, попадающихъ въ каналъ, опредѣляетъ его максимально-допустимую глубину и, вообще, оказываетъ самое серьезное вліяніе на гидравлическіе элементы его живого сѣченія.



## Общее заключеніе.

### 1. Критическая скорость.

Въ вышеприведенныхъ краткихъ выводахъ изъ теоріи Кеннеди мною сдѣлана попытка объяснить нѣкоторыя стороны процесса заиленія и связать его съ гидравлическими элементами русла канала.

Мы видѣли, что всѣ гидравлическіе элементы русла канала такъ или иначе вліяютъ на опредѣляемый критическій элементъ, каковымъ можетъ стать каждый изъ нихъ. Такъ указывалась зависимость критическаго уклона отъ величины расхода и глубины. На его значеніе окажетъ вліяніе и величина коэффициента  $C$ , въ свою очередь зависящаго отъ  $n$  коэффициента шероховатости,  $R$  подводнаго радіуса.

Все это еще больше утверждаетъ наши предыдущія указанія о значеніи теоріи заиленія Кеннеди.

Среди многочисленныхъ разсужденій по вопросамъ о заиленіи инженеръ Кеннеди впервые конкретизировать эти общія разсужденія, связавъ уравненіемъ значенія критической скорости и глубины воды въ каналѣ, выдѣливъ послѣднюю, какъ наиболѣе вліяющій факторъ въ процессъ заиленія.

Однако, не меньшее значеніе имѣютъ въ этомъ явленіи количество и крупность наносовъ, проносимыхъ каналомъ. При наблюденіяхъ Кеннеди, положенныхъ въ основу его теоріи, не было получено данныхъ, характеризующихъ эту сторону изучаемаго явленія. Поэтому можно думать, что наносы, проходящіе

черезъ наблюдаемыя имъ различныя сѣченія каналовъ, болѣе или менѣе отличались другъ отъ друга, какъ это и наблюдается въ предѣлахъ ирригаціонной системы. На основѣ такого предположенія легко допустить возможность переконструирования даннаго инженеромъ Кеннеди уравненія.

## 2. Критическая скорость, какъ функція глубины.

Изъ нашихъ разсужденій и указанія Higham'a усматривается логическое противорѣчіе вида формулы Кеннеди съ измѣненіемъ силы противодѣйствія заилненію русла. Во избѣжаніе чего необходимо измѣнить степень 0,64 при  $d$  (глубинѣ), взявъ ее изъ кривой зависимости гидравлическаго радіуса, или правильнѣе  $\sqrt{R}$ , отъ глубины въ трапеціадальномъ сѣченіи. Имѣемъ:

$$\sqrt{R} = \sqrt{\frac{(b + m d) \cdot d}{b + 2 d \sqrt{m^2 + 1}}} \dots \dots \dots \text{(XVIII)}$$

Обозначивъ отношеніе  $\frac{b}{d} = k$  и выводя изъ-подъ знака радикала значеніе  $d$ , получимъ:

$$\sqrt{R} = d^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{k + m}{k + 2 \sqrt{m^2 + 1}}} \dots \dots \dots \text{(XIX)}$$

Для прямоугольнаго сѣченія  $m = 0$ :

$$\sqrt{R} = d^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{k}{k + 2}} \dots \dots \dots \text{(XX)}$$

Для прямоугольнаго сѣченія безконечной ширины и ограниченной глубины ( $k = \infty$ ):

$$\sqrt{R} = d^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots \text{(XXI)}$$

Только въ этомъ послѣднемъ случаѣ устанавливается простая зависимость значенія  $\sqrt{R}$  отъ глубины. Въ уравненія XVIII, XIX и XX входитъ величина  $k$ , указывающая на вліяніе формы живого сѣченія, зависящей въ свою очередь отъ глубины  $d$ .

По мѣрѣ увеличенія размѣровъ оросительнаго канала обыкновенно растетъ и отношеніе его ширины къ глубинѣ воды —  $k$ .

Вмѣстѣ же съ увеличеніемъ значенія  $k$  выраженіе  $\sqrt{\frac{k}{k+2}}$  быстро



приближается къ единицѣ, давая эту единицу въ предѣлѣ (при  $k = \infty$ ).

Возьмемъ для наглядности числовой примѣръ <sup>1)</sup>.

Для трапециадальнаго русла съ одиночными откосами ( $m = 1$ ) для глубины  $d = 2$  фут.

1. для ширины русла по дну, равнаго 2 фут. значеніе

$$\sqrt{R} = 1,022$$

2. для ширины русла по дну, равнаго 280 фут. значеніе

$$\sqrt{R} = 1,405$$

3. предѣльное значеніе  $\sqrt{R} = \sqrt{d} = 1,414$

Для глубины  $d = 4$  фута соответствующія значенія  $\sqrt{R}$  будутъ:

1) 1,342—2) 1,977—3) 2,000

Это приводитъ насъ къ тому заключенію, что въ выраженіи зависимости критической скорости отъ глубины скорѣй всего слѣдовало бы ввести вмѣсто степени 0,64 (близко къ  $\frac{2}{3}$ ) величину  $\frac{1}{2}$ .

Но и въ этомъ случаѣ останется вышеуказанная нелогичность въ измѣненіи силы, противодѣйствующей заилненію русла. Въ этомъ мы имѣемъ указаніе на то, что функціональная зависимость критической скорости отъ глубины выражаетъ неполную зависимость процесса заилненія отъ гидравлическихъ элементовъ живого сѣченія.

Во всякомъ случаѣ мы не можемъ считать доказаннымъ правильность установленной Кеннеди степени при значеніи глубины  $d$ . Эту часть уравненія заилненія мы обозначимъ  $d^x$ , рекомендуя при обработкѣ наблюденій испробовать для  $x$  и значеніе  $\frac{1}{2}$ .

Наши разсужденія касаются функціональной зависимости критической скорости отъ глубинъ, а не отъ величины фракцій наносовъ, когда примѣнима шестая степень.

<sup>1)</sup> Флиннъ. Движеніе воды. Таблица № 8.

### 3. Зависимость критической скорости отъ количества и крупности наносовъ.

Общая зависимость критической скорости отъ количества и крупности наносовъ сама собою очевидна. Чѣмъ наносы мельче, тѣмъ большее количество ихъ будетъ поднято однимъ и тѣмъ же объемомъ воды при заданной скорости восходящей струи и наоборотъ.

Гидравлическая крупность, т. е. скорость осѣданія частицъ породы въ спокойной, дистиллированной, опредѣленной температуры (15°C) водѣ ближе всего рисуетъ качественную сторону наносовъ, какъ матеріаловъ для взвѣшиванія.

Отношеніе вѣса количества наносовъ (напр., въ граммахъ) къ единицѣ взятаго для пробы объема воды (напр., литръ) называютъ относительной мутностью потока въ точкѣ взятія пробы. Относительная мутность  $p$  характеризуетъ степень насыщенности потока наносами и приводитъ къ установленію слѣдующихъ трехъ состояній воды, текущей съ наносами: пересыщенного, насыщеннаго и недосыщеннаго.

При этомъ для заданныхъ условій протеканія потока и, главное, въ зависимости отъ величины скорости вертикальной восходящей струи и крупности наносовъ, при неограниченности въ ихъ количествѣ, будемъ имѣть состояніе потока максимально насыщеннаго наносамъ. Соответствующую этому условію мутность слѣдуетъ назвать абсолютной или предѣльной, обозначая ее  $p_0$ .

Предѣльная мутность въ данной точкѣ указываетъ на критическое состояніе потока, и при малѣйшемъ измѣненіи условій протеканія создается или пересыщенное или же недосыщенное состояніе воды наносами.

Потокъ въ естественныхъ условіяхъ стремится въ каждой точкѣ живого сѣченія обладать предѣльной мутностью, каковая, однако, видоизмѣняется по его живому сѣченію, пульсируя около нѣкоторыхъ среднихъ значеній.

Предѣльная мутность при одинаковыхъ условіяхъ протеканія зависитъ отъ величины вертикальной составляющей скорости и



гидравлической крупности насосовъ, поэтому одно вышеуказанное понятіе мутности безъ указанія фракціи наносовъ не охватываетъ полностью рассматриваемаго явленія.

Такимъ образомъ, мутность воды въ какой-нибудь опредѣленной точкѣ непрерывно мѣняется, мѣняется значеніе  $p$  и механическій составъ взвѣшенныхъ наносовъ.

Поэтому при взятіи пробъ для наблюденія за мутностью потока необходимо отдавать предпочтеніе способамъ длительнаго наполненія.

Переходъ отъ значеній относительныхъ мутностей въ данной точкѣ къ среднимъ значеніямъ мутности по вертикали и, наконецъ, къ среднему значенію по живому сѣченію вполне аналогиченъ соотвѣствующимъ построеніямъ и вычисленіямъ средней скорости теченія.

Чтобы отвѣтить на вопросъ: будетъ ли имѣть мутность, опредѣленная въ данной точкѣ потока, свое предѣльное значеніе, необходимо знать величину вертикальной составляющей скорости и соотвѣствующее ей значеніе предѣльной мутности при механическомъ составѣ наносовъ въ изслѣдуемой точкѣ.

Путемъ опытовъ и наблюденій, о которыхъ будетъ сказано ниже, можно, какъ намъ кажется, освѣтить вопросъ о предѣльной мутности и ея зависимости отъ вертикальныхъ составляющихъ скоростей теченія и крупности взвѣшенныхъ наносовъ.

Извѣстно, что наносы неравномѣрно распредѣляются по живому сѣченію потока. Нижніе слои воды являются болѣе насыщенными наносами съ преобладаніемъ крупныхъ фракцій.

Если предположить, что въ данной точкѣ живого сѣченія потока постоянно дѣйствуетъ вертикальная составляющая скорости воды, то можно было бы ожидать, что наносы распредѣлятся по вертикали по ихъ крупности. Тогда на днѣ оказались бы наносы только крупныхъ фракцій. На самомъ дѣлѣ этого нѣтъ. На днѣ имѣются самыя различныя фракціи. Это объясняется пульсацией струи и измѣненіемъ величины вертикальной составляющей скорости воды.

Возьмемъ какую-нибудь точку по вертикали и прослѣдимъ за измѣненіями ея относительной мутности. Положимъ, что въ нѣкоторый моментъ эта величина равна  $p$ . При уменьшеніи величины

вертикальной составляющей скорости воды начнется выпадение фракцій, при ея увеличеніи—нарастаніе ихъ количества и крупности. Такъ, что нѣкоторая часть взвѣшенныхъ наносовъ будетъ находиться въ колебательно-поступательномъ движеніи. И чѣмъ мельче фракціи наносовъ, тѣмъ амплитуда колебаній будетъ больше. Самые крупные наносы, отвѣчающіе наибольшимъ величинамъ вертикальной составляющей скорости теченія воды, будутъ лишь слегка приподниматься отъ дна.

Но даже при неизмѣнно дѣйствующей вертикальной составляющей скорости теченія воды можно себѣ представить, что тотъ источникъ, откуда поступаютъ наносы въ данную точку на днѣ или вертикали столь обилень, что восходящая струя воды не въ силахъ поднимать всего количества наносовъ.

И наоборотъ, если источникъ питанія наносами недостаточенъ по сравненію съ величиной и временемъ дѣйствія вертикальной составляющей скорости теченія, то мы будемъ имѣть дѣло съ недосыщеннымъ состояніемъ восходящихъ струй. При этомъ будетъ обнаруживаться тенденція къ раздѣленію наносовъ по ихъ фракціямъ. Въ этомъ случаѣ только временное періодическое уменьшеніе и равенство нулю <sup>1)</sup> вертикальной составляющей скорости теченія воды можетъ способствовать сохраненію мелкихъ фракцій на днѣ.

Однако, насколько сравнительно просто измѣрить и изобразить мутность потока, настолько трудно при этомъ дать такой механическій анализъ пробы наносовъ, который далъ бы возможность легко и просто сравнивать между собою степень насыщенности наносами различныхъ потоковъ. Беря въ основу раздѣленіе наносовъ по ихъ гидравлической крупности, мы должны рѣшить вопросъ о болѣе удобной формѣ изображенія ихъ механическаго состава.

Въ таблицѣ № 2 приведена общепринятая классификація механическихъ элементовъ почвъ и материнскихъ породъ по діаметру частицъ, съ указаніемъ по Hazen'у соотвѣствующихъ величинъ ихъ гидравлической крупности.

---

<sup>1)</sup> И даже отрицательное значеніе, т. е. направленіе вертикальной составляющей внизъ.



Таблица № 2.

НА ИМЕНОВАНИЕ.	Диаметръ частицъ.	Гидравлическая крупность.		
		мм.	дюймъ	фут.
		сек.	сек.	сек.
Илъ . . . . .	0,000			
Пыль . . . { тонкая . . . . . { {	0,001	0,00154	0,00041	
	0,005	0,0385	0,0014	
	0,01	0,154	0,0061	
	0,05	2,9	0,114	
	0,25	26,5	1,04	0,087
Песокъ . . . { мелкій . . . . . { {	0,29	30,6	1,2	0,1
	0,50	53	2,09	0,17
	1,00	100	3,94	0,33
	3,00			

Имѣется цѣлый рядъ основаній для такого дѣленія механическихъ элементовъ почвъ. И если данная проба предназначена для общаго изученія и въ томъ числѣ химическаго, то отдѣленіе и раздѣленіе самыхъ мелкихъ фракцій является неизбежнымъ. Это также необходимо при изученіи химическаго и механическаго состава наносовъ для установленія степени ихъ плодородія.

Въ данномъ же случаѣ насъ интересуютъ наносы съ точки зрѣнія возможности заиленія ими каналовъ.

Въ индійской практикѣ, какъ объ этомъ подробнѣе будетъ указано въ выпускѣ II этого труда, установлено, что только фракціи наносовъ гидравлической крупности 0,1 фут. сек. и крупнѣе опасны съ точки зрѣнія заиленія каналовъ.

Въ вышеприведенной таблицѣ эта фракція выдѣлена особо въ седьмой строкъ сверху. Наносы гидравлической крупности 0,1  $\frac{\text{фут.}}{\text{сек.}}$  близки къ границамъ группъ песчаная пыль и мелкій песокъ. Поэтому мы можемъ выразить указанное положеніе

индійской практики въ болѣе привычной терминологіи, сказавъ, что лишь песокъ опасенъ для каналовъ.

Въ работахъ Туркестанской Гидрометрической Части гидравлическая крупность 2 мм. сек. положена въ основу раздѣленія анализа пробы на двѣ части, причемъ эти данныя наносятся графически по вертикалямъ живого сѣченія рѣки, гдѣ брались пробы.

Причина такого раздѣленія лежитъ отчасти въ принятомъ способѣ непрерывнаго анализа по методу инженера В. Г. Глушкова <sup>1)</sup>. Фракція 2 мм. сек. является почти границей между частицами крупной и песчаной пыли. Однако эта граница не представляетъ особаго интереса съ точки зрѣнія заиленія каналовъ, несмотря даже на крупный скачекъ въ гидравлической крупности отъ частицъ діаметра 0,05 къ 0,25 мм.

Механическіе анализы въ работахъ Туркестанской Гидрометрической Части производятся чрезвычайно детально, съ выдѣленіемъ слишкомъ большого количества фракцій. Мы считаемъ необходимымъ еще разъ подчеркнуть то, что рѣчь идетъ объ изученіи наносовъ, съ точки зрѣнія заиленія каналовъ. Поэтому, пользуясь практикой англійскихъ инженеровъ въ Индіи, при изученіи наносовъ съ этой точки зрѣнія можно рекомендовать для нихъ слѣдующую классификацію (таблица № 3).

Таблица № 3.

№ классовъ.	Наименованіе.	Гидравлическая крупность.		
		мм. сек.	дюймъ сек.	фут. сек.
I.	Землистая часть . . . . .	менѣе 25	1	0,08
II.	Мелкій песокъ . . . . .	25—50	1—2	0,08—0,16
III.	Средній песокъ . . . . .	50—75	2—3	0,16—0,25
IV.	» . . . . .	75—100	3—4	0,25—0,33
V.	Крупный песокъ . . . . .	100—125	5—6	0,33—0,48
VI.	» . . . . .	125—150	6—7	0,48—0,57
И далѣе.				

<sup>1)</sup> См. отчетъ за 1912 годъ, томъ III и другіе.



Землистая часть, состоящая изъ ила и пыли, отнесена въ одинъ классъ и въ случаѣ изученія наносовъ въ другихъ цѣ-  
ляхъ можетъ быть какъ угодно детализирована, не нарушая уста-  
навливаемыхъ классовъ. При отсутствіи затрудненій, что будетъ  
зависѣть отъ метода механическаго анализа, слѣдуетъ рекомен-  
довать выдѣленіе въ классъ I песчаной пыли.

Для анализа пробы наносовъ для раздѣленія на фракціи,  
согласно классификаціи табл. № 3, потребуется мало времени и  
способы для анализа могутъ примѣняться самые простѣйшіе.  
При этомъ землистая часть, наиболѣе трудно поддающаяся ме-  
ханическому анализу, можетъ быть получена, какъ остатокъ по  
отдѣленіи песчаныхъ фракцій. Въ такомъ случаѣ время для  
производства механическаго анализа опредѣлится скоростью вы-  
паденія наиболѣе мелкихъ частицъ II класса, т. е. частицъ  
гидравлической крупности 25 мм./сек. При производствѣ ана-  
лиза по непрерывному способу инженера В. Г. Глушкова на это  
потребуется 32 секунды (800:25).

Въ таблицѣ № 4 приведенъ желательный видъ механиче-  
скаго анализа наносовъ.

Таблица № 4.

№ классъ.	Гидра- влическ. круп- ность.	Время осѣданія при длинѣ трубки.		Вѣсъ фрак- цій.	Вѣсъ фракцій, отнесенныхъ къ 1 литру воды.	Процентное содержаніе отдѣльныхъ фракцій.	Ординаты (отъ раздѣле- нія данныхъ столбца 6 на 25).
		800 мм.	2.000 мм.				
	мм. сек.	сек.	сек.	0,0001 грм.	0,0001 грм.	%	грм. мм.
1	2	3	4	5	6	7	8
I	< 25	< 32	< 80		15.000	47,4	600
II	25—50	32—16	80 40		9.000	28,4	360
III	50—75	16—10,7	40—26,7		6.000	19,0	240
IV	75—100	10,7—8	26,7—20		1.000	3,2	40
V	100—125	8—6,4	20—16		500	1,6	20
IV	125—150	6,4—5,3	16—13,3		100	0,3	4
Итого. . . . .				p =	3,160 грм./лит. 99,9%		

Время осѣданія будетъ соответствовать принятой высотѣ  
трубки. Столбецъ 3 соответствуетъ трубкѣ при непрерывномъ

анализѣ. Столбецъ 4—высотѣ трубки, примѣняемой инженерами въ Индіи. Столбецъ 8 долженъ служить для графическаго изображенія анализа, гдѣ по оси абсциссъ будутъ откладываться значенія гидравлической крупности, а по оси ординатъ частныя отъ дѣленія вѣса фракціи на длину, которую она занимаетъ по оси абсциссъ.

Этотъ способъ имѣетъ несравненные преимущества передъ способомъ черт. № 2 индійскихъ инженеровъ, давая наглядное изображеніе механическаго анализа паносовъ, въ видѣ ломанной линіи, а при болѣе детальномъ изученіи въ видѣ кривой, поддающейся математической обработкѣ. Въ этомъ отношеніи заслуживаютъ особаго вниманія работы инженера В. Г. Глушкова.

Примѣняя математическій анализъ къ кривымъ механическаго состава породы, инженеръ В. Г. Глушковъ устанавливаетъ <sup>1)</sup> законъ статическихкихъ моментовъ для процесса осажденія породъ и затѣмъ вычисляетъ работу, производимую свободнымъ паденіемъ породы въ средѣ. Эта работа будетъ равна произведенію изъ вѣса въ средѣ частицъ породы на путь, проходимый за время  $T$ .

Обозначимъ:

$\eta$ —гидравлическую крупность частицъ породы.

$a_1$ —удѣльный вѣсъ частицъ.

$a_0$ —удѣльный вѣсъ среды.

Кривая механическаго состава породы изображается уравненіемъ:

$$p = f(\eta).$$

Полная величина работы

$$E = \frac{a_1 - a_0}{a_1} \cdot T \cdot S, \text{ гдѣ}$$

$$S = \int_0^{\eta_1} p \cdot \eta \, d\eta$$

есть площадь кривой статическихкихъ моментовъ отъ кривой механическаго состава относительно оси  $p$ .

<sup>1)</sup> См. отчетъ Туркестанской Гидрометрической Части за 1910 г. т. 1, стр. 200 и дальѣ.



При  $T=1$  (секундѣ) работа будетъ равна

$$E_0 = \frac{a_1 - a_0}{a_1} S.$$

Измѣреніе  $E_0$  есть  $10^{-6} \frac{\text{килограммометр.}}{\text{секунда . литр.}} =$

$$= \frac{10^{-6}}{75} \frac{\text{лошад. сил.}}{\text{литр.}}$$

Относя анализъ породы къ 1 грамму навѣски, получимъ для  $E_0$  измѣреніе  $\left[ \frac{10^{-6}}{75} \frac{\text{лошад. сил.}}{1 \text{ граммъ породы.}} \right]$ .

Въ этомъ случаѣ  $E_0$  называется инженеромъ Глушковымъ механическимъ или гидромеханическимъ эквивалентомъ.

Однако, съ точки зрѣнія изученія взвѣшиванія потокомъ наносовъ, заслуживаетъ большаго вниманія первая формула для выраженія работы  $E_0$ , т. е. отнесенная къ 1 литру воды.

Представимъ себѣ двѣ породы, состоящія изъ частицъ разныхъ фракцій и имѣющія одно и то же значеніе  $E_0$ , т. е.

$$E_0 = \frac{a_1 - a_0}{a_1} S_1 = \frac{a_2 - a_0}{a_2} S_2 \dots \dots \dots (XXII)$$

Удѣльный вѣсъ среды принять однимъ и тѣмъ же.

Если разсматривать явленіе для частицъ одного и того же удѣльнаго вѣса, то будемъ имѣть  $a_1 = a_2$  и

$$S_1 = S_2 \dots \dots \dots (XXIII)$$

т. е. площади кривыхъ статическихъ моментовъ равны между собою.

Сравнивая между собою двѣ навѣски, состоящія каждая только изъ фракцій одной крупности, получимъ изъ уравненія XXIII:

$$p_1 \gamma_1 = p_2 \gamma_2 \text{ и}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \dots \dots \dots (XXIV)$$

Это уравненіе показываетъ, что при выше принятыхъ условіяхъ насыщенность потока наносами обратно пропорціональна ихъ гидравлической крупности, т. е. чѣмъ крупнѣе частицы наносовъ, тѣмъ будетъ наблюдаться меньшая насыщенность ими воды.

Песчаные наносы имѣютъ близкіе удѣльные вѣса, и ихъ взвѣшиваніе водою будетъ болѣе или менѣе слѣдовать указанному нами закону, что, какъ указывалось выше, въ дѣйствительности и наблюдается.

Понятіе о гидромеханическомъ эквивалентѣ включаетъ въ себѣ произведеніе двухъ величинъ: вѣса наносовъ и ихъ гидравлической крупности и характеризуетъ вполнѣ явленіе взвѣшиванія наносовъ восходящими струями потока.

Поэтому значеніе гидромеханическаго эквивалента  $E_0$ , отнесеннаго къ единицѣ объема воды (1 литру, 1 куб. футу), можетъ войти въ уравненіе заиленія.

По мѣрѣ увеличенія значенія вертикальной составляющей скорости теченія воды  $W$  значеніе  $E_0$  должно увеличиваться. Вмѣстѣ съ увеличеніемъ  $W$  будетъ увеличиваться и крупность поднимаемыхъ наносовъ  $\eta$ . При этомъ предѣльнымъ значеніемъ для гидравлической крупности поднимаемыхъ наносовъ будетъ  $\eta = W$ .

Можно предполагать, что при неизмѣнномъ значеніи  $W$  величина  $E_0$  будетъ постоянна, даже при измѣняющемся значеніи  $p$ , въ зависимости отъ гидравлической крупности взвѣшиваемыхъ наносовъ. Для разсматриваемаго явленія наиболѣе интереснымъ значеніемъ для  $E_0$  будетъ то, которое включаетъ въ себѣ фракціи гидравлической крупности  $\eta = W$ . Поэтому значеніе  $E_0$  необходимо сопровождать указаніемъ максимальнаго значенія  $\eta$  и пробы брать изъ мѣстъ живого сѣченія потока съ болѣе крупными наносами, т. е. у дна.

Тѣмъ болѣе, что вопросъ о заиленіи канала не разрѣшается изученіемъ лишь взвѣшиваемыхъ наносовъ. Не меньшую роль, какъ мы увидимъ во второмъ выпускѣ, имѣютъ и наносы передвигающіеся по дну, каковыя при песчаномъ днѣ близки по своему механическому составу къ наносамъ въ придонныхъ слояхъ.

И Kennedy, когда ему потребовалось указать составъ наносовъ для его критическихъ скоростей, далъ анализы пробъ со дна рѣкъ у головныхъ сооружений каналовъ.

При измѣненіи величины скорости восходящей струи значеніе  $E_\eta$  будетъ видоизмѣняться: расти вмѣстѣ съ увеличеніемъ



значенія  $W$  и наоборотъ. Поэтому, вводя въ уравненіе заиленія  $E_{\eta}$ , слѣдуетъ его сопровождать нѣкоторой степенью  $y$ . Значеніе этого показателя степени при  $E_{\eta}$ , какъ и значенія самого гидромеханическаго эквивалента, повидимому, могутъ быть болѣе или менѣе точно опредѣлены въ лабораторной обстановкѣ.

#### 4. Уравненіе заиленія.

Такимъ образомъ, уравненіе заиленія получаетъ слѣдующій видъ:

$$V_0 = A \cdot E_{\eta}^y \cdot d^x \dots \dots \dots (XXV)$$

Оно охватываетъ почти полностью все явленіе заиленія. Особенно если при выборѣ коэффициента  $A$  принимать во вниманіе комплексъ второстепенныхъ элементовъ, такъ или иначе вліяющихъ на значеніе критической скорости.

Въ уравненіи Кеннеди имѣемъ  $A \cdot E_{\eta}^y = 0,84$  и  $x = 0,64$ .

При опредѣленіи величины  $E$  проще исходить изъ классификаціи таблицы № 3. По выясненіи же для него предѣльнаго значенія, соотвѣтствующаго критической скорости, слѣдуетъ детализировать механическіе анализы и опредѣлять значеніе  $E$  болѣе точно.

#### 5. Опыты и наблюденія.

Вопросъ о заиленіи болѣе чѣмъ какой-либо другой вопросъ требуетъ практическаго изученія. Только наблюденія, организованныя въ самыхъ широкихъ масштабахъ, могутъ дать матеріалъ для тѣхъ или иныхъ заключеній какъ теоретическаго, такъ и практическаго характера. Явленія взвѣшиванія и перенесенія потоками наносовъ менѣе всего поддаются лабораторному наблюденію, хотя и не исключается возможность изученія этимъ путемъ нѣкоторыхъ отдѣльныхъ вопросовъ.

Изъ таковыхъ наибольшаго вниманія заслуживаетъ изученіе зависимости предѣльной мутности  $p_0$  отъ значеній вертикальной составляющей скорости теченія воды ( $W$ ), гидравлической крупности ( $\eta$ ) поднимаемыхъ наносовъ и комплекса другихъ вліяющихъ факторовъ ( $B$ ).





мутности и величины гидромеханическаго эквивалента, почти исключительно, какъ думается, будутъ зависѣть отъ величинъ  $W$  и  $\eta$ .

Всѣ эти работы въ конечномъ счетѣ должны выяснить значеніе части уравненія заилненія  $E''_{\eta}$ .

По предѣльной мутности, гидравлической крупности наносовъ и ихъ гидромеханическому эквиваленту можно будетъ судить о значеніи вертикальныхъ составляющихъ скоростей въ текущемъ потокѣ, чѣмъ отчасти намѣчается путь къ изученію тѣхъ факторовъ, которые вызываютъ при теченіи жидкости пульсаціи струй и способствуютъ появленію восходящихъ токовъ воды.

Этотъ вопросъ—о взаимодѣйствіи значеній  $W$  съ гидравлическими элементами потока—можетъ быть подвергнутъ главному изученію въ природѣ. Здѣсь почти единственный путь, путь наблюденій.

При этомъ эти наблюденія надо вести, по возможности, въ тѣхъ мѣстахъ, гдѣ явленія имѣютъ установившійся характеръ, т. е. въ данномъ случаѣ вниманіе должно быть сосредоточено на тѣхъ живыхъ сѣченіяхъ каналовъ или рѣкъ, гдѣ не происходитъ процесса ни размыва дна и береговъ, ни отложенія наносовъ. Наблюденія въ другихъ мѣстахъ могутъ лишь послужить подтвержденіемъ и, можетъ, отчасти объясненіемъ тѣхъ законовъ, которые и будутъ, выражены соотвѣтствующими уравненіями.

## П р и л о ж е н і я.

Приложенія, числомъ 7, заимствованы нами изъ различныхъ источниковъ, списокъ которыхъ будетъ данъ въ выпускѣ II.

Все они не требуютъ особыхъ объясненій и только «Типичныя русла каналовъ по BUCKLEY» (приложеніе № 7 <sup>1)</sup>) нуждаются въ нѣкоторыхъ поясненіяхъ. Эти таблицы служатъ для выбора живыхъ сѣченій канала, удовлетворяющихъ одному изъ трехъ нижеслѣдующихъ условий:

А—Русла незаиляющіяся по формулѣ Кеннеди  
 $V_0 = 0,84 d^{0,64}$ .

В—Русла незаиляющіяся и съ наибольшими расходами.

Наибольшій расходъ—при максимальномъ значеніи отношенія площади живого сѣченія къ длинѣ смоченнаго периметра.

Русла съ наибольшими расходами опредѣляются изъ таблицы <sup>1)</sup>:

Боковые откосы.	Глубина воды въ руслѣ.	Ширина по основанію.	Ширина по верху.	Средняя гидравличе- ская глубина
Корень квадратный изъ площади живого сѣченія умножать на слѣдующіе коэффициенты:				
Полуциркульное. . . . .	0,798	0	1,596	0,399
0 : 1 (Вертик.) . . . .	0,707	1,414	1,414	0,354
$\frac{1}{2}$ : 1   »   . . . .	0,759	0,938	1,697	0,379
$\frac{3}{4}$ : 1   »   . . . .	0,748	0,675	1,996	0,374
1 : 1   »   . . . .	0,740	0,613	2,093	0,370
$1\frac{1}{2}$ : 1   »   . . . .	0,689	0,417	2,484	0,345
2 : 1   »   . . . .	0,636	0,300	2,844	0,318

Приложеніе № 7 даетъ значенія для каналовъ съ боковыми откосами 1 : 1.

С—Русла съ наибольшими расходами.

<sup>1)</sup> изъ Irrigation Pocket Book.



Таблица значений критической скорости по уравнению  $V_0 = \alpha 0,84 d^{0,64}$  для коэффициента  $\alpha = 0,80; 0,90; 1,00; 1,10; 1,20; 1,30$ .

Глубина воды въ каналѣ (фут.).	Критическая скорость въ фут. сек. изъ уравненія $V_0 = \alpha 0,84 d^{0,64}$ при значеніяхъ коэффициента $\alpha$ , равнаго					
	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30
2	1,04	1,17	1,30	1,43	1,56	1,69
2,5	1,21	1,36	1,51	1,66	1,81	1,96
3	1,36	1,53	1,70	1,87	2,04	2,21
3,5	1,50	1,69	1,88	2,07	2,26	2,34
4	1,63	1,84	2,04	2,24	2,45	2,65
4,5	1,76	1,98	2,20	2,42	2,64	2,86
5	1,88	2,11	2,35	2,59	2,82	3,05
5,5	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25
6	2,11	2,38	2,64	2,90	3,17	3,43
7	2,34	2,63	2,92	3,21	3,50	3,80
8	2,54	2,86	3,18	3,50	3,82	4,13
9	2,74	3,09	3,43	3,77	4,12	4,46
10	2,93	3,30	3,67	4,04	4,40	4,77
11	3,12	3,54	3,90	4,29	4,68	5,07
12	3,30	3,71	4,12	4,53	4,94	5,36

Приложение № 2.

Таблица Kennedy критическихъ уклоновъ и скоростей для различныхъ расходовъ и глубинъ, при коэффициентѣ шероховатости  $n = 0,02375$ .

Расходъ куб. фут. въ секунду.	Для наибольшихъ глубинъ.			Для умѣренныхъ глубинъ.			Для минимальныхъ глубинъ.		
	Глубина (фут.).	Критическая скорость $V_0$ (фут. — сек.).	Критическій уклонъ въ тысячныхъ доляхъ.	Глубина (фут.).	Критическая скорость $V_0$ (фут. — сек.).	Критическій уклонъ въ тысячныхъ доляхъ.	Глубина (фут.).	Критическая скорость $V_0$ (фут. — сек.).	Критическій уклонъ въ тысячныхъ доляхъ.
10	2,1	1,30	0,50	2,0	1,30	0,48	1,8	1,21	0,43
25	2,5	1,51	0,43	2,4	1,46	0,37	2,2	1,39	0,34
35	2,8	1,63	0,39	2,6	1,55	0,34	2,4	1,46	0,31
50	3,1	1,74	0,34	2,9	1,66	0,31	2,6	1,55	0,29
75	3,4	1,85	0,32	3,1	1,74	0,29	2,9	1,66	0,27
100	3,7	1,94	0,31	3,3	1,82	0,28	3,0	1,70	0,26
125	4,0	2,04	0,30	3,6	1,91	0,27	3,2	1,77	0,26
150	4,2	2,10	0,29	3,7	1,95	0,26	3,4	1,85	0,25
175	4,3	2,13	0,28	3,9	2,01	0,25	3,5	1,88	0,24
200	4,5	2,20	0,27	4,0	2,04	0,24	3,6	1,91	0,23
250	4,8	2,26	0,26	4,2	2,10	0,24	3,8	1,98	0,23
300	5,0	2,35	0,26	4,5	2,20	0,23	4,0	2,04	0,22
350	5,3	2,41	0,25	4,6	2,23	0,23	4,2	2,10	0,22
400	5,5	2,50	0,25	4,8	2,29	0,22	4,3	2,13	0,22
450	5,7	2,56	0,25	5,0	2,35	0,22	4,4	2,17	0,21
500	5,8	2,62	0,24	5,1	2,38	0,22	4,6	2,23	0,21
600	6,1	2,66	0,24	5,3	2,44	0,21	4,8	2,29	0,21
700	6,3	2,73	0,23	5,5	2,50	0,21	5,0	2,35	0,20
800	6,6	2,80	0,23	5,8	2,62	0,21	5,2	2,41	0,20
900	6,8	2,86	0,22	5,9	2,61	0,20	5,3	2,44	0,19
1000	7,0	2,92	0,22	6,0	2,64	0,20	5,4	2,47	0,19
1500	7,8	3,12	0,21	6,8	2,85	0,20	6,1	2,66	0,19
2000	8,5	3,31	0,20	7,3	3,00	0,19	6,6	2,80	0,18

Примѣчаніе: уклонъ выраженъ въ частяхъ тысячныхъ долей. Напр. 0,39 обозначаетъ уклонъ 0,00039.

**Таблица Garrett'a критическихъ уклоновъ для различныхъ рас**

Расходъ куб. фут. въ секунду.										Расходъ куб. фут. въ секунду.						Скорость.	
5			10			20			40			60			Скорость.		
Скорость.															Скорость.		
Глубина.	0,8	V <sub>0</sub>	1,2	0,8	V <sub>0</sub>	1,2	0,8	V <sub>0</sub>	1,2	0,8	V <sub>0</sub>	1,2	0,8	V <sub>0</sub>	1,2	Глубина.	
2	0,39	0,68	1,00	0,25	0,40	0,67	0,17	0,30	0,44	0,14	0,24	0,33	0,13	0,20	0,31	2	
2,5	—	—	—	0,36	0,60	1,00	0,23	0,38	0,85	0,16	0,27	0,43	0,135	0,24	0,38	2,5	
3	—	—	—	—	—	—	0,29	0,52	—	0,19	0,33	0,54	0,14	0,28	0,45	3	
3,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,24	0,43	0,70	0,18	0,33	0,52	3,5	
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,30	0,56	0,86	0,22	0,38	0,60	4	
4,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,27	0,42	0,76	4,5	
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,31	0,47	—	5	
5,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,5	
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9	

**Таблица Garrett'a критическихъ уклоновъ для различныхъ рас**

Расходъ куб. фут. въ секунду.										Расходъ куб. фут.			
		200		400			600			1.000			
Скорость.													Скорость.
Глубина.	0,8	V <sub>0</sub>	1, 2	0,8	V <sub>0</sub>	1,2	0,8	V <sub>0</sub>	1,2	0,8	V <sub>0</sub>	1,2	Глубина.
4	0,105	0,17	0,26	0,105	0,145	0,22	0,105	0,135	0,20	0,10	0,13	0,185	4
5	0,14	0,21	0,32	0,105	0,16	0,25	0,105	0,145	0,22	0,10	0,135	0,195	5
6	0,185	0,27	0,42	0,11	0,185	0,29	0,11	0,16	0,25	0,10	0,145	0,21	6
7	—	—	—	0,125	0,22	0,35	0,11	0,18	0,29	0,10	0,155	0,24	7
8	—	—	—	0,145	0,27	0,44	0,12	0,21	0,34	0,10	0,17	0,27	8
9	—	—	—	—	—	—	0,14	0,25	0,42	0,11	0,19	0,30	9
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10
11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11
12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12

Примѣчаніе: уклонъ выраженъ въ частяхъ тысячныхъ долей. Напр., 0,39 изобра



Скорость и глубина, при коэффициентѣ шероховатости  $n=0,0225$ .

секунду.			Расходъ куб. фут. въ секунду.												Скорость. Глубина.
100			200			400			600			1.000			
0,8	V <sub>0</sub>	1,2	0,8	V <sub>0</sub>	1,2	0,8	V <sub>0</sub>	1,2	0,8	V <sub>0</sub>	1,2	0,8	V <sub>0</sub>	1,2	
12	0,18	0,29	0,115	0,17	0,25	0,105	0,165	0,24	—	—	—	—	—	—	2
125	0,20	0,32	0,115	0,175	0,26	0,105	0,17	0,25	—	—	—	—	—	—	2,5
135	0,22	0,36	0,12	0,18	0,28	0,11	0,175	0,26	0,10	0,16	0,25	—	—	—	3
155	0,26	0,41	0,125	0,20	0,30	0,11	0,18	0,26	0,10	0,165	0,25	—	—	—	3,5
175	0,30	0,48	0,135	0,22	0,32	0,115	0,185	0,27	0,105	0,17	0,26	0,10	0,165	0,24	4
20	0,34	0,56	0,14	0,24	0,36	0,115	0,19	0,29	0,11	0,17	0,27	0,10	0,17	0,24	4,5
23	0,39	0,64	0,15	0,26	0,40	0,12	0,20	0,31	0,115	0,18	0,28	0,10	0,17	0,25	5
26	0,47	—	0,17	0,29	0,45	0,18	0,22	0,33	0,12	0,19	0,29	0,105	0,175	0,26	5,5
30	—	—	0,21	0,34	0,52	0,14	0,24	0,36	0,125	0,20	0,31	0,11	0,18	0,27	6
—	—	—	—	—	—	0,155	0,28	0,43	0,135	0,23	0,34	0,12	0,20	0,30	7
—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,15	0,27	0,37	0,13	0,22	0,33	8
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,14	0,25	0,38	9

Приложение № 4.

Скорость и глубина, при коэффициентѣ шероховатости  $n=0,0200$ .

секунду.			Расходъ куб. фут. въ секунду.									Скорость. Глубина.
2.000			4.000			6.000			10.000			
0,9	V <sub>0</sub>	1,2	0,9	V <sub>0</sub>	1,2	0,9	V <sub>0</sub>	1,2	0,9	V <sub>0</sub>	1,2	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4
0,10	0,125	0,18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5
0,105	0,13	0,185	0,10	0,12	0,17	—	—	—	—	—	—	6
0,105	0,135	0,195	0,10	0,12	0,18	—	0,12	0,17	—	—	—	7
0,11	0,14	0,21	0,105	0,125	0,185	0,10	0,12	0,18	—	—	—	8
0,12	0,15	0,23	0,105	0,13	0,19	0,105	0,125	0,185	—	0,12	0,18	9
0,13	0,16	0,25	0,11	0,135	0,205	0,105	0,13	0,19	0,10	0,123	0,18	10
0,14	0,17	—	0,115	0,150	0,22	0,11	0,135	0,20	0,102	0,126	0,185	11
0,155	0,19	—	0,12	0,165	0,23	0,11	0,14	0,205	0,104	0,13	0,19	12

дѣлать уклонъ 0,00039.

Таблица Buckley незаиляющихся руселъ каналовъ для Пенджаба.

$$V_0 = 0,84 d^{0,64}.$$

Критическая скорость $V_0$ фут.-сек.	Русло канала.		Коэф. шероховатости (n) русла канала				
	Глубина воды фут.	Средняя гидравлическая глубина.	0,017	0,020	0,0225	0,025	0,030
			Критическій уклонъ канала (единица относится къ :).				
1,30	2,00	1,25	5,500	4,000	3,200	2,400	1,650
	2,00	1,75	9,000	6,500	4,800	3,800	2,800
1,70	3,00	1,75	5,400	3,800	3,000	2,400	1,550
	3,00	2,75	10,000	7,000	5,700	4,600	3,200
2,04	4,00	2,5	6,200	4,400	3,500	2,900	1,950
	4,00	3,5	9,800	7,000	5,500	4,600	3,200
2,35	5,00	3,0	6,000	4,200	3,400	2,800	1,850
	5,00	4,5	10,400	7,500	5,900	4,800	3,400
2,64	6,00	3,5	5,800	4,200	3,300	2,700	1,850
	6,00	5,5	10,800	7,800	6,300	5,000	3,600
2,92	7,00	4,0	5,700	4,000	3,200	2,600	1,850
	7,00	6,5	11,000	8,000	6,300	5,000	3,700
3,18	8,00	4,5	5,600	4,500	3,500	2,900	2,000
	8,00	7,5	11,400	8,300	6,600	5,300	3,800
3,43	9,00	5,0	6,400	4,000	3,100	2,600	1,800
	9,00	8,5	11,400	8,300	6,700	5,400	3,900

Приложение № 6.

Таблица Buckley незаиляющихся руселъ каналовъ для Синда.

$$V_0 = \frac{3}{4} \cdot 0,84 d^{0,64}.$$

Критическая скорость $V_0$ фут.-сек.	Русло канала.		Коэф. шероховатости (n) русла канала				
	Глубина воды фут.	Средняя гидравлическая глубина.	0,017	0,020	0,0225	0,025	0,030
			Критическій уклонъ канала (единица относится къ :).				
0,97	2,00	1,25	9,600	7,000	5,500	4,400	3,000
	2,00	1,75	15,500	11,000	8,600	7,000	4,800
1,27	3,00	1,75	9,500	6,700	5,000	4,200	2,900
	3,00	2,75	17,500	12,500	10,000	8,000	5,500
1,53	4,00	2,5	11,000	7,600	6,100	4,800	3,400
	4,00	3,5	17,000	12,300	9,700	8,000	5,500
1,76	5,00	3,0	10,500	7,600	6,000	4,800	3,400
	5,00	4,5	19,000	13,500	10,600	8,800	6,200
1,98	6,00	3,5	10,500	7,500	6,000	4,800	3,400
	6,00	5,5	20,000	14,500	11,500	9,200	6,500
2,19	7,00	4,0	10,500	8,600	6,600	5,500	3,800
	7,00	6,5	21,000	15,000	12,000	9,800	6,900
2,38	8,00	4,5	10,000	7,400	5,800	4,800	3,400
	8,00	7,5	21,500	15,500	12,400	10,000	7,200
2,57	9,00	5,0	10,000	7,300	5,700	4,700	3,300
	9,00	8,5	22,000	15,600	12,500	10,200	7,200



## Типичныя русла каналовъ по Bickley, съ боковыми откосами 1:1.

Ширина по дну.	Глубина водн.	Площадь живого сѣ- ченія.	Скорость.	Средняя гид- равлическая глубина.	Коэф. шероховатости.			Критическая скорость $V_0$ .	Примѣчаніе.
					$n=0,020.$	$n=0,025.$	$n=0,030.$		
Фут.	Фут.	Квадр. фут.	Фут.- сек.	Фут.	Уклонъ (единица къ :)			Фут.-сек.	
Для расхода около 5 куб. фут. въ сек.									
40,0	0,5	20,0	0,25	0,48	17.000	12.000	8.500	0,24	А.
12,5	0,75	10,0	0,50	0,57	7.000	4.500	3.000	0,54	А.
5,0	1,0	6,0	0,85	0,77	4.000	2.600	1.600	0,84	А.
1,5	1,5	4,5	1,10	0,8	2.800	1.700	1.100	1,07	В.
1,7	2,0	7,5	0,65	1,0	10.000	6.500	4.200	1,30	С.
1,8	2,2	9,1	0,55	1,1	15.000	10.000	7.000	1,38	С.
2,0	2,4	10,5	0,50	1,2	20.000	14.000	9.000	1,46	С.
Для расхода около 10 куб. фут. въ сек.									
26,0	0,75	20,0	0,50	0,71	10.000	7.000	4.400	0,54	А.
10,5	1,0	11,5	0,85	0,86	5.000	3.200	2.000	0,84	А.
4,5	1,5	9,0	1,10	1,03	4.000	2.600	1.700	1,07	А.
2,0	2,0	8,0	1,30	1,05	3.000	1.900	1.300	1,30	В.
2,2	2,6	12,5	0,80	1,3	10.000	6.500	4.500	1,54	С.
2,3	2,8	14,3	0,70	1,4	15.000	9.000	6.000	1,62	С.
2,6	3,0	16,8	0,60	1,5	20.000	14.000	9.500	1,70	С.
Для расхода около 25 куб. фут. въ сек.									
29,0	1,0	30,0	0,85	0,94	6.000	3.500	2.200	0,84	А.
14,0	1,5	23,3	1,10	1,27	6.000	3.400	2.200	1,07	А.
7,5	2,0	19,0	1,30	1,45	4.800	3.000	2.000	1,30	А.
4,0	2,5	16,3	1,50	1,47	3.600	2.400	1.550	1,50	А.
2,0	3,0	15,0	1,70	1,43	2.800	1.750	1.200	1,70	В.
3,0	3,5	22,7	1,10	1,76	10.000	5.500	3.600	1,87	С.
3,0	4,0	28,0	0,90	1,95	15.000	9.000	6.000	2,04	С.
3,5	4,0	30,0	0,80	2,02	20.000	13.000	9.000	2,04	С.

Ширина по дну.	Глубина вода.	Площадь живого сѣ- ченія.	Скорость.	Средняя гид- равлическая глубина.	Козф. шероховатости.			Критическая скорость $V_c$ .	Примѣчаніе.
					$n=0,020.$	$n=0,025.$	$n=0,030.$		
Фут.	Фут.	Квадр. фут.	Фут.- сек.	Фут.	Уклонъ (единица къ : )			Фут.-сек.	

Для расхода около 50 куб. фут. въ сек.

58,0	1,0	59,0	0,85	0,97	6.000	3.600	2.400	0,84	A.
17,0	2,0	38,0	1,30	1,67	6.000	3.600	2.600	1,30	A.
11,0	2,5	33,7	1,50	1,86	5.500	3.400	2.200	1,50	A.
7,0	3,0	30,0	1,70	1,93	4.400	2.800	1.800	1,70	A.
4,0	3,5	26,3	1,90	1,89	3.400	2.200	1.400	1,87	A.
2,5	4,0	26,0	2,00	1,88	3.000	1.900	1.300	2,04	B.
4,0	4,5	38,3	1,30	2,29	10.000	6.000	4.200	2,19	C.
4,0	5,0	45,0	1,10	2,48	15.000	9.000	6.500	2,35	C.
4,5	5,0	47,5	1,00	2,55	20.000	12.000	8.000	2,35	C.

Для расхода около 100 куб. фут. въ сек.

36,5	2,0	77,0	1,30	1,82	7.000	4.400	3.000	1,30	A.
16,5	3,0	58,5	1,70	2,34	6.000	3.600	2.400	1,70	A.
8,3	4,0	49,2	2,04	2,5	4.600	3.000	2.000	2,04	A.
3,5	5,0	42,5	2,35	2,41	3.100	2.000	1.400	2,35	B.
5,0	6,0	66,0	1,55	3,0	10.000	6.000	4.400	2,64	C.
5,4	6,5	77,3	1,3	3,25	15.000	10.000	7.000	2,78	C.
5,6	6,75	83,4	1,15	3,37	20.000	13.000	9.000	2,85	C.

Для расхода около 200 куб. фут. въ сек.

36,5	3,0	118,5	1,70	2,63	7.000	4.400	3.000	1,70	A.
21,0	4,0	100,0	2,04	3,09	6.000	4.000	2.600	2,04	A.
12,0	5,0	85,0	2,35	3,25	4.800	3.200	2.200	2,35	A.
6,5	6,0	75,0	2,64	3,19	3.600	2.400	1.600	2,64	A.
4,5	6,5	71,5	2,78	3,12	3.200	2.200	1.500	2,78	B.
6,5	7,6	107,2	1,83	3,82	10.000	6.000	4.200	3,07	C.
6,8	8,3	125,3	1,60	4,13	15.000	9.500	6.500	3,25	C.
7,2	8,7	138,3	1,43	4,35	20.000	12.000	8.500	3,36	C.



Ширина по дну.	Глубина воды.	Площадь живого сѣ- чения.	Скорость.	Средняя гид- равлическая глубина.	Коэф. шероховатости.			Критическая скорость V <sub>0</sub> .	Примѣчаніе.
					n=0,020.	n=0,025.	n=0,030.		
Фут.	Фут.	Квадр. фут.	Фут.- сек.	Фут.	Уклонъ (единица къ :)			Фут.-сек.	
Для расхода около 300 куб. фут. въ сек.									
56,0	3,0	177	1,70	2,74	7.000	4.600	3.200	1.70	A.
33,0	4,0	148	2,04	3,34	6.500	4.200	2.800	2.04	A.
21,0	5,0	130	2,35	3,70	6.000	3.800	2.600	2.35	A.
13,0	6,0	114	2,64	3,80	4.600	3.000	2.200	2.64	A.
6,0	7,5	101	3,05	3,72	3.400	2.200	1.550	3.05	B.
7,5	9,0	148	2,05	4,50	10.000	6.500	4.400	3.43	C.
8,0	9,5	166	1,75	4,75	15.000	9.500	6.500	3.55	C.
8,5	10,0	185	1,60	5,02	20.000	13.000	9.000	3.67	C.
Для расхода около 400 куб. фут. въ сек.									
75,0	3,0	234	1,70	2,80	7.500	4.800	3.400	1,70	A.
45,0	4,0	196	2,04	3,47	6.500	4.400	3.000	2,04	A.
29,0	5,0	170	2,35	3,94	6.000	3.800	2.800	2,35	A.
19,0	6,0	150	2,64	4,17	5.000	3.200	2.400	2,64	A.
12,5	7,0	136	2,92	4,22	4.400	3.000	2.000	2,92	A.
6,0	8,5	123	3,30	4,10	3.400	2.200	1.550	3,30	B.
8,5	10,0	185	2,20	5,02	10.000	6.500	4.800	3,67	C.
9,0	10,5	205	1,90	5,29	15.000	9.500	7.000	3,78	C.
9,5	11,0	225	1,75	5,54	20.000	12.000	8.500	3,89	C.
Для расхода около 500 куб. фут. въ сек.									
57,0	4,0	244	2,04	3,57	7.500	4.600	3.200	2,04	A.
38,0	5,0	215	2,35	4,12	6.500	4.400	3.000	2,35	A.
26,0	6,0	192	2,64	4,46	5.700	3.800	2.600	2,64	A.
18,0	7,0	175	2,92	4,62	5.000	3.400	2.200	2,92	A.
12,0	8,0	160	3,18	4,62	4.400	3.000	2.000	3,18	A.
7,0	9,0	144	3,43	4,43	3.400	2.200	1.500	3,43	B.
9,0	11,0	220	2,30	5,48	10.000	6.500	4.600	3,89	C.
9,5	11,5	242	2,00	5,75	15.000	9.500	6.700	4,00	C.
10,0	12,5	281	1,82	6,19	20.000	13.000	9.300	4,22	C.

Ширина по дуу.	Глубина вода.	Площадь живого сечения.	Скорость.	Средняя гид- равлическая глубина.	Коэф. шероховатости.			Критическая скорость V <sub>0</sub> .	Примечание.
					n=0,020.	n=0,025.	n=0,030.		
Фут.	Фут.	Квадр. фут.	Фут.- сек.	Фут.	Уклонъ (единица къ: ).			Фут.-сек.	
Для расхода около 1.000 куб. фут. въ сек.									
80,0	5,0	425	2,35	4,51	7.500	5.000	3.400	2,35	A.
57,0	6,0	378	2,64	5,10	7.000	4.600	3.200	2,64	A.
42,0	7,0	343	2,92	5,54	6.500	4.200	3.000	2,92	A.
31,0	8,0	312	3,18	5,82	6.000	3.800	2.600	3,18	A.
17,0	10,0	270	3,67	5,96	4.400	2.800	2.000	3,67	A.
10,0	11,5	247	4,00	5,81	3.600	2.400	1.650	4,00	B.
11,5	14,0	357	2,80	7,00	10.000	6.500	4.400	4,54	C.
12,5	15,0	412	2,43	7,51	15.000	9.500	7.000	4,75	C.
13,0	16,0	464	2,20	8,00	20.000	13.000	9.000	4,94	C.
Для расхода около 1.500 куб. фут. въ сек.									
123,0	5,0	640	2,35	4,66	8.000	5.500	3.600	2,35	A.
89,0	6,0	570	2,64	5,37	7.500	4.800	3.400	2,64	A.
51,0	8,0	472	3,18	6,41	6.500	4.200	3.000	3,18	A.
31,0	10,0	410	3,67	6,91	5.500	3.400	2.400	3,67	A.
18,0	12,0	360	4,12	6,92	4.200	2.800	2.000	4,12	A.
11,5	13,5	338	4,43	6,88	3.600	2.400	1.700	4,43	B.
13,5	16,5	495	3,10	8,20	10.000	6.500	4.600	5,04	C.
14,5	17,5	560	2,70	8,75	15.000	9.500	7.000	5,23	C.
15,5	18,5	629	2,45	9,27	20.000	13.000	9.000	5,42	C.
Для расхода около 2.000 куб. фут. въ сек.									
120,0	6,0	756	2,64	5,51	8.000	5.000	3.600	2,64	A.
70,0	8,0	624	3,18	6,73	7.000	4.600	3.400	3,18	A.
45,0	10,0	550	3,67	7,50	6.000	4.000	2.800	3,67	A.
29,0	12,0	492	4,12	7,82	5.000	3.400	2.400	4,12	A.
13,5	15,0	427	4,75	7,63	3.600	2.400	1.700	4,75	B.
15,0	18,0	594	3,30	9,01	10.000	6.500	4.600	5,32	C.
16,0	19,5	692	2,90	9,73	15.000	9.500	6.500	5,61	C.
17,0	21,0	798	2,60	10,44	20.000	13.000	9.500	5,90	C.



## Замѣченныя опечатки.

---

Страницы:	Строчки:	Напечатано:	Должно быть:
14	5 снизу	$p + p_1 + p_2 + \dots$	$p, p_1, p_2, \dots$
27	11 »	$0,84 d^{0,64} = \sqrt{C} \sqrt{Ri}$	$0,84 d^{0,64} = C \sqrt{Ri}$
28	6 сверху	$d (m - 2 \sqrt{1 + m^2})$	$d (m + 2 \sqrt{1 + m^2})$
28	8 »	$\left[ \frac{D}{0,84 d^{1,64}} + 2 d \right]$	$\left[ \frac{D}{0,84 d^{1,64}} - 2 d \right]$
41	1 »	насосовъ	наносовъ

---









